

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Iva Vadas

Zagreb, srpanj 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor :

izv.prof.dr.sc. Damir Godec, dipl.ing

Studentica:

Iva Vadas

Zagreb, srpanj 2018

Izjavljujem da sam ovaj rad izradila samostalno koristeći stručna znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Od srca hvala...

...mentoru izv.prof.dr.sc. Damiru Godecu, na iznimnoj susretljivosti, stručnom znanju i pomoći.

...docentici doc. dr.sc. Ani Pilipović na iznimnoj pomoći koju mi je pružila, velikom strpljenju i trudu, bez koje ovaj rad ne bi bio završen.

...asistentici mr.sc. Maji Rujnić-Sokele na susretljivosti i ljubaznoj pomoći.

...gospodinu Ljubi koji je strpljenjem i iskustvom izuzetno pomogao i bez kojeg također ovaj rad ne bi bio završen.

...gospodinu Tomi Prliću i poduzeću Tehnoplast Profili d.o.o. na susretljivosti i mogućnosti obavljanja eksperimentalnog dijela rada.

...poduzeću Nomis d.o.o na osiguranom materijalu za potrebe eksperimenta.

Naposlijetku, hvala mojim roditeljima, bratu, sestri i šogoru na potpori tijekom studija.

Iva Vadas



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske radove studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment,
inženjerstvo materijala te mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa:	
Ur. broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **IVA VADAS**

Mat. br.: **0035187658**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Utjecaj parametara injekcijskog prešanja na rasteznu čvrstoću linije spajanja pri preradi amorfnih i kristalastih plastomera**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Influence of injection moulding parameters on welding line tensile strength in processing of amorphous and crystalline thermoplastics**

Opis zadatka:

Proces injekcijskog prešanja često se koristi za izradu otpresaka kompleksne geometrije te većih dimenzija uz primjenu većeg broja ušća, pri čemu se ne može izbjeći pojava linija spajanja na otprescima. Linija spajanja je mjesto na otpresku gdje se sastaju dva čela taljevine tijekom faze volumnog popunjavanja kalupne šupljine plastomernom taljevinom. Linije spajanja predstavljaju diskontinuitet u strukturi materijala, posebice ako je na mjestima njihovog nastajanja temperatura čela taljevine niža od propisanih (tzv. hladne linije spajanja). Kako linije spajanja predstavljaju ne samo vizualni nedostatak otpreska, već mogu imati za posljedicu i smanjenje mehaničkih svojstava (npr. rastezne čvrstoće), potrebno je poznavati utjecaj pojedinih parametara injekcijskog prešanja na svojstva linija spajanja, u cilju njihovog optimiranja i dobivanja što boljih svojstava otpreska.

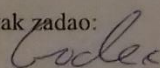
U radu je potrebno načiniti pregled dostupne literature u kojoj se analizira utjecaj pojedinih parametara injekcijskog prešanja na svojstva otpresaka, s posebnim osvrtom na linije spajanja. Na temelju rezultata tih analiza, potrebno je izabrati odgovarajući plan pokusa te na standardiziranim ispitnim tijelima provesti analizu utjecaja signifikantnih parametara injekcijskog prešanja na rasteznu čvrstoću linija spajanja, i to jednom pri preradi amorfnog plastomera, a drugi puta pri preradi kristalastog plastomera. U radu je potrebno raspraviti dobivene rezultate te zaključiti, ima li razlike u ponašanjima različitih tipova plastomera pri preradi injekcijskim prešanjem.

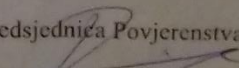
U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:
03. svibnja 2018.

Rok predaje rada:
05. srpnja 2018.

Predviđeni datum obrane:
11. srpnja 2018.
12. srpnja 2018.
13. srpnja 2018.

Zadatak zadao:

prof. dr. sc. Damir Godec

Predsjednica Povjerenstva:

prof. dr. sc. Biserka Runje

SADRŽAJ

1 UVOD	1
2 INJEKCIJSKO PREŠANJE	2
2.1 POLIMERNI MATERIJALI POGODNI ZA INJEKCIJSKO PREŠANJE	3
2.2 PLASTOMERI	3
2.3 SUSTAV ZA INJEKCIJSKO PREŠANJE PLASTOMERNIH TALJEVINA	4
2.4 CIKLUS INJEKCIJSKOG PREŠANJA	6
3 PARAMETRI INJEKCIJSKOG PREŠANJA	9
3.1 NAJVAŽNIJI PARAMETRI PROCESA INJEKCIJSKOG PREŠANJA	10
3.1.1 Tlak ubrizgavanja	10
3.1.2 Hidraulički tlak u jedinici za ubrizgavanje	10
3.1.3 Tlak u kalupnoj šupljini	11
3.1.4 Preklapanje na naknadni tlak	13
3.1.5 Naknadni tlak (naknadni tlak u kalupnoj šupljini)	13
3.1.6 Temperatura taljevine	14
3.1.7 Temperatura stijenke kalupne šupljine	14
3.1.8 Temperatura medija za temperiranje	16
3.1.9 Brzina medija za temperiranje	16
3.1.10 Brzina ubrizgavanja (vrijeme ubrizgavanja)	17
3.1.11 Vrijeme djelovanja naknadnog tlaka	18
3.1.12 Vrijeme hlađenja otpreska	19
3.1.13 Vrijeme ciklusa injekcijskog prešanja	21
3.2 UTJECAJ PARAMETARA INJEKCIJSKOG PREŠANJA NA SVOJSTVA OTPRESAKA	21
3.1.1 Dimenzijska stabilnost otpreska	23
4 KALUP	24
4.1 ISO KALUPI (S VIŠE KALUPNIH ŠUPLJINA)	24
5 ISPITNA TIJELA	28
5.1 PRIPREMA ISPITNIH TIJELA	28
5.2 NORMA ISO 527 – 2: 1993	28
6 ISPITIVANJE MEHANIČIH SVOJSTAVA MATERIJALA	31
6.1 MEHANIČKA SVOJSTVA OTPRESAKA	31
6.2 RASTEZNA ČVRSTOĆA	31
6.3 STATIČKI RASTEZNI POKUS	32
7 EKSPERIMENTALNI DIO	33
7.1 CILJ POKUSA	33
7.2 ISPITNI MATERIJAL	33

7.3 KRISTALASTI PLASTOMER – POLIPROPILEN.....	33
7.4 AMORFNI PLASTOMER – POLISTIREN	35
7.5 OPREMA	36
7.6 CENTRALNO – KOMPOZITNI PLAN POKUSA	39
7.7 POKUS 1 – KRISTALNI PLASTOMER - ODREĐIVANJE UTJECAJA SIGNIFIKANTNIH PARAMETARA INJEKCIJSKOG PREŠANJA NA RASTEZNU ČVRSTOĆU LINIJE SPOJA ISPITNIH TIJELA OD POLIPROPILENA	42
7.8 POKUS 2 – AMORFNI PLASTOMER – ODREĐIVANJE UTJECAJA SIGNIFIKANTNIH PARAMETARA INJEKCIJSKOG PREŠANJA NA RASTEZNU ČVRSTOĆU LINIJE SPOJA ZA POLISTIREN.....	47
7.9 ANALIZA POKUSA 1 - KRISTALNI PLASTOMER - ODREĐIVANJE UTJECAJA SIGNIFIKANTNIH PARAMETARA INJEKCIJSKOG PREŠANJA NA RASTEZNU ČVRSTOĆU LINIJE SPOJA ISPITNIH TIJELA OD POLIPROPILENA	51
7.10 ANALIZA POKUSA 2 - AMORFNI PLASTOMER - ODREĐIVANJE UTJECAJA SIGNIFIKANTNIH PARAMETARA INJEKCIJSKOG PREŠANJA NA RASTEZNU ČVRSTOĆU LINIJE SPOJA ISPITNIH TIJELA OD POLISTIRENA.....	53
7.11 RASPRAVA O DOBIVENIM REZULTATIMA POKUSA 1 i 2.....	55
9 ZAKLJUČAK.....	56
10 LITERATURA.....	57
11 PRILOZI.....	58

Popis slika

Slika 2.1: Stroj za injekcijsko prešanje [2].....	2
Slika 2.2: Shematski presjek ubrizgavalice [3]	4
Slika 2.3 : Razne izvedbe pužnih vijaka [3]	5
Slika 2.4: Shematski prikaz ubrizgavalice [3]	5
Slika 2.5: Vremensko trajanje faza tipičnog ciklusa procesa injekcijskog prešanja [2]	6
Slika 2.6: Faza 1, ciklus injekcijskog prešanja [5]	7
Slika 2.7: Faza 2, ciklus injekcijskog prešanja [4]	7
Slika 2.8: Faza 3, ciklus injekcijskog prešanja [4]	8
Slika 2.9: Faza 4, ciklus injekcijskog prešanja [4]	8
Slika 3.1.: Informacije dobivene praćenjem tlakova u hidrauličkom sustavu i kalupnoj šupljini [5,6]..	11
Slika 3.2.: Utjecaj faza tijeka tlaka u kalupnoj šupljini na otpresak [5,6]	12
Slika 3.3.: Otpresak s mjehurićem [7]	13
Slika 3.5: Utjecaj temperature taljevine na tijek hidrauličkog tlaka i tlaka u kalupnoj šupljini:.....	14
θ_T - temperatura taljevine, t_u - vrijeme ubrizgavanja [5,6]	14
Slika 3.6.: Temperaturno polje u kalupu: θ_K - temperatura stijenke kalupne šupljine, θ_D – dodirna temperatura, θ_{OK} - temperatura otvaranja kalupa, t_c - vrijeme ciklusa injekcijskog prešanja, t_h - vrijeme hlađenja otpreska [5,6]	15
Slika 3.7.: Utjecaj temperature stijenke kalupne šupljine na tijek tlaka u hidrauličkom sustavu ubrizgavalice i tlaka u kalupnoj šupljini [5,6].....	16
Slika 3.8.: Prevelika brzina ubrizgavanja [8]	17
Slika 3.9: Određivanje optimalnog vremena djelovanja naknadnog tlaka [5,6]	19
Slika 3.10.: Primjer sustava kanala za temperiranje [8]	19
Slika 3.11.: Analiza ciklusa injekcijskog prešanja [5,6]	21
Slika 3.12.: Veza pojedinih parametara procesa s kvalitetom otpreska [6]	22
Slika 4.1: Kalupna ploča za ISO kalup tip A [6].....	25
Slika 4.2: Kalupna ploča, B tip ISO kalupa [6]	25
Slika 4.3: Različite konfiguracije umetaka [6]	26
Slika 5.1: Oblik ispitnog tijela [6]	28
Slika 5.2: Specijalni oblik ispitnog tijela tip 5A i 5B [6]	30
Slika 6.1: Način opterećivanja ispitnog tijela tijekom statičkog rasteznog pokusa [6]	31
Slika 7.1: Uzroci slabih svojstava linije spoja [11].....	33
Slika 7.2: Polipropilen	34
Slika 7.3: Polistiren	36
Slika 7.4: Ubrizgavalica Battenfeld UNILOG 1000	36

Slika 7.5: a) Pomični dip kalupa s C konfiguracijom b) Nepomični dio kalupa	37
Slika 7.6: Powerfix digitalna pomična mjerka	37
Slika 7.7: SHIMADZU kidalica.....	38
Slika 7.8: centralno – kompozitni plan pokusa s 3 faktora [13]	39
Slika 7.9: Potpuni faktorski plan pokusa $3k$ [13].....	40
Slika 7.10: Centralno-kompozitni plan pokusa s 2 faktora [13].....	40
Slika 7.11: Problemi s linijom spoja dva toka taljevine sa suprotnih krajeva pri većoj brzini ubrizgavanja	43
Slika 7.12: Prva ispitna tijela dobivena smanjenjem brzinom ubrizgavanja na minimalnu	43
Slika 7.13: Injekcijski isprešana ispitna tijela od polipropilena	44
Slika 7.14: a) Kidanje ispitnog tijela b) Lom ispitnog tijela na liniji spoja	45
Slika 7.15: Dijagram rasteznog naprezanja – istezanja za PP – na dijagramu su prikazane linije samo od jednog ispitnog tijela po stanjima pokusa.....	46
Slika 7.16: a) Ostatak materijala kod uljevnog sustava pri nižim temperaturama u odnosu na više temp (b).....	48
Slika 7.17: a) Kidanje ispitnog tijela na kidalici b) Lom ispitnog tijela po liniji spoja	49
Slika 7.18: Dijagram rasteznog naprezanja – istezanja za PS – na dijagramu su prikazane linije samo od jednog ispitnog tijela po stanjima pokusa.....	50
Slika 7.19: Ovisnost rastezne čvrstoće o temperaturi taljevine i vremenu naknadnog tlaka u pokusu1	52
Slika 7.20: Ovisnost rastezne čvrstoće o temperaturi taljevine i vremenu naknadnog tlaka u pokusu2	54

Popis tablica

Tablica 3.1: Parametri injekcijskog prešanja povezani s ubrizgavalicom (svijetlo plavo) i kontrolnom jedinicom stroja (tamno plavo) [2].....	9
Tablica 3.2: Djelovanje naknadnog tlaka [7]	14
Tablica 3.3: Utjecajne veličine na proces ubrizgavanja i kvalitetu proizvoda [8]	18
Tablica 3.3: Utjecaj parametara injekcijskog prešanja na dimenzije otpreska [6]	23
Tablica 5.1: Dimenzije ispitnog tijela 1A i 1B [6]	29
Tablica 5.2: Dimenzije ispitnog tijela 1BA i 1BB [6]	29
Tablica 5.3: Dimenzije ispitnog tijela 5A i 5B [6]	30
Tablica 7.1. Svojstva navedena od strane proizvođača za polipropilen.....	34
Tablica 7.2: Tehnički list polistirena Synthos PS GP 154	35
Tablica 7.3: Karakteristike ubrizgavalice Battenfeld UNILOG 1000.....	36
Tablica 7.4.: Vrijednosti α za rotabilan centralno-kompozitni plan pokusa. [6]	41
Tablica 7.5: Konstantni parametri injekcijskog prešanja tijekom provedbe pokusa1.....	42
Tablica 7.6: Razine faktora za CCD plan pokusa (PP).....	42
Tablica 7.7 Izmjerene dimenzije i izračunata površina linije spoja po stanjima (PP)	44
Tablica 7.8: Rastezna čvrstoća ispitana na kidalici za sva stanja pokusa (PP)	45
Tablica 7.9: Konstantni parametri injekcijskog prešanja tijekom provedbe pokusa2.....	47
Tablica 7.10 Razine faktora za CCD plan pokusa (PS).....	47
Tablica 7.11 Izmjerene dimenzije i izračunata površina linije spoja po stanjima (PS)	48
Tablica 7.12 Rastezna čvrstoća ispitana na kidalici za sva stanja pokusa (PS)	49
Tablica 7.13. Rezultati analize varijance – utjecaj parametara na rasteznu čvrstoću u pokusu1.	51
Tablica 7.15. Rezultati analize varijance – utjecaj parametara na rasteznu čvrstoću u pokusu2.	53

SAŽETAK

U radu je teorijski opisano injekcijsko prešanje polimera i najvažniji parametri istog. Opisani su ISO kalupi, ISO ispitna tijela te postupci ispitivanja mehaničkih svojstava.

U sklopu rada proveden je eksperimentalni dio, kojem je svrha bila ispitivanje utjecaja signifikantnih parametara injekcijskog prešanja na rasteznu čvrstoću linije spoja. Bilo je potrebno injekcijskim prešanjem preraditi jedan amorfni te jedan kristalni plastomer te istražiti postoje li i koje su razlike u njihovom ponašanju pri preradi injekcijskim prešanjem.

Eksperiment je proveden na ubrizgavalici Battenfeld UNILOG 1000 za materijale polipropilen i polistiren.

Ključne riječi: *injekcijsko prešanje, linija spoja, rastezna čvrstoća, polipropilen, polistiren, utjecaj parametara injekcijskog prešanja*

SUMMARY

In this paper the injection moulding of polymers and its most important parameters are theoretically described. ISO moulds, ISO test pieces and some mechanical properties testing methods are described.

As part of the paper, an experiment was conducted, in which the influence of the significant injection moulding parameters on the tensile strength of the weld line was tested. It was necessary to make one amorphous and one crystalline elastomer and to investigate whether there were any differences in their behavior in processing by injection moulding.

The experiment was carried out on injection machine Battenfeld UNILOG1000 for polypropylene and for polystyrene.

Key words: *injection moulding, welding line, tensile strength, polypropylene, polystyrene, influence of injection moulding parameters*

1 UVOD

Polimerna industrija ima duboki tehno-ekonomski utjecaj na društvo već gotovo stoljeće. Polimeri se koriste u pakiranju, namještaju, građevinskim materijalima, automobilskoj i zrakoplovnoj industriji, sportu, biomedicini, elektronicu, itd.

Što je važnije, polimeri su se prilagodili uvijek promjenjivim društvenim i tehnološkim zahtjevima. Dakle, mnoge od trenutačno popularnih proizvoda, kao što su pametni telefoni, računala i druge tehnološke inovacije teško je zamisliti u odsutnosti polimera.

Ne čini se vjerojatnim da će u skoroj budućnosti doći do smanjenja ove važne uloge polimera i u budućim tehnološkim napretcima.

Injekcijsko prešanje najprilagodljiviji je i najdinamičniji postupak obrade polimera. Koristi se za proizvodnju proizvoda od gotovo svih plastomera, mješavina, kompozita i nanokompozita.

Svestrani proces injekcijskog prešanja može se koristiti za velikoserijsku proizvodnju dijelova složenih oblika, od mikro do velikih dimenzija, višeslojnih i u boji, s ili bez umetaka.

Injekcijski prešani proizvodi moraju zadovoljiti mnoštvo specifikacija vezanih za oblik, dimenzije, dimenzijsku stabilnost, čvrstoću, karakteristike površine i mnoge druge specifikacije vezane uz funkcionalnost i zahtjeve namjeravane primjene.

Veliki broj proizvođača proizvoda, kalupa i strojeva za injekcijsko prešanje, doveo je do raznih tipova i veličina strojeva te do razvoja raznih optimalnih strategija proizvodnje koje odgovaraju na postavljenje zahtjeve.

Kritičan aspekt uspjeha procesa injekcijskog prešanja ovisi o razumijevanju i kontroli pojedinih koraka postupka, termo-mehaničkoj povijesti polimera koji se prerađuje i utjecaju ove povijesti na karakteristike krajnjeg proizvoda.

Kako su mnoge od ovih interakcija složene, vrlo je važno razviti sustav praćenja koji omogućava prepoznavanje statusa i odgovora kritičnih varijabli procesa.

Uspješan proces injekcijskog prešanja mora biti popraćen uspješnim praćenjem procesa, optimizacijom i strategijom kontrole.

2 INJEKCIJSKO PREŠANJE

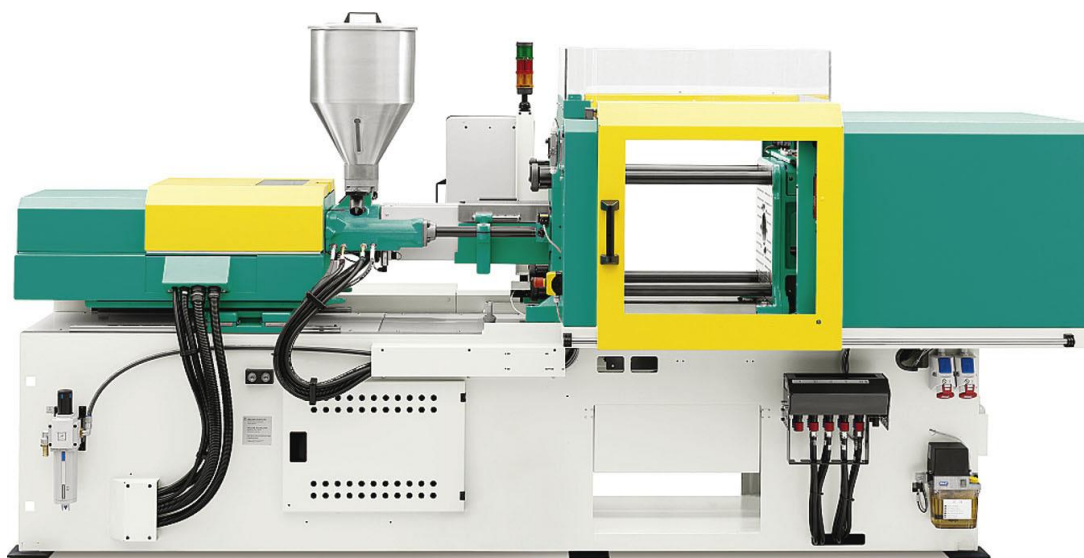
Injekcijsko prešanje jedan je od najvažnijih i trenutno najusavršenijih postupaka prerade polimera. Ovim se postupkom prerađuju sve vrste polimera, a posebice plastomerne taljevine. Injekcijskim prešanjem mogu se prerađivati i ne polimerni materijali. Primjena se raširila od keramičkih smjesa, kombinacija materijala (plastika, metal, keramika) pa sve do injekcijskog prešanja živih stanica. [1]

Injekcijsko prešanje odlikuju visoki stupanj automatiziranosti te suvremeno vođenje procesa koje se temelji na mikroprocesorima i primjeni računala. Upravo zahvaljujući postignutom stupnju automatiziranosti, postupak je vrlo ekonomičan i prikladan za masovnu neprekinutu proizvodnju 24 sata na dan, sedam dana u tjednu. Gotovi dijelovi, komplicirane geometrije i vrlo velikih zahtjeva na tolerancije mogu se izraditi u jednom koraku, a najčešće naknadna obrada nije potrebna. Injekcijskim prešanjem moguće je integrirati različite funkcije u jedan proizvod, kombinirati krute i savitljive dijelove, načiniti otpresak u više boja, proizvesti integralne pjenaste tvorevine.

Jedna od najvećih prednosti injekcijskog prešanja je mogućnost integriranja i drugih procesa u proizvodni ciklus injekcijskog prešanja kako bi se proizveli složeniji proizvodi.

Do danas je zabilježeno preko 240 inačica injekcijskog prešanja. Prema komercijaliziranosti, injekcijsko prešanje slijedi odmah nakon ekstrudiranja. [1]

Prema definiciji, injekcijsko prešanje polimera ciklički je postupak praoblikovanja ubrizgavanjem polimerne tvari potrebne smične viskoznosti u temperiranu kalupnu šupljinu. Materijal, najčešće u obliku granula ili praha, rastaljuje se u ubrizgavalici te ubrizgava u kalup pod visokim tlakom. Dolazi do polireakcije i/ili umreživanja, geliranja i/ili hlađenja čime otpresak postaje podoban za vađenje iz kalupa. Ovim je postupkom moguće proizvesti otpreske mase manje od miligrama pa sve do približno 180 kg. [1]



Slika 2.1: Stroj za injekcijsko prešanje [2]

2.1 POLIMERNI MATERIJALI POGODNI ZA INJEKCIJSKO PREŠANJE

Polimerni materijali sami po sebi ne bi se mogli koristiti za injekcijsko prešanje. Potrebno ih je modificirati raznim aditivima (obično integrirani za vrijeme proizvodnje od strane proizvođača polimera), kako bi posjedovali prikladnu otpornost na svjetlo, otpornost na toplinu i potrebna fizikalna svojstva. Tada se materijali mogu dodatno modificirati prema potrebi postupcima spajanja, s ciljem ojačavanja, dobivanja specifičnih boja i funkcionalnosti.

Spektar modificiranih polimernih materijala prikladnih za injekcijsko prešanje je širok. Sa ciljem pojednostavljenja, samo se za plastomerne materijale smatra da napreduju u ovom području. Da bi materijal bio prikladan za injekcijsko prešanje, mora posjedovati sljedeća svojstva:

- sposobnost deformiranja kako bi se proizveo željeni oblik
- dobro podnošenje određene količine topline i smicanja kako bi se omogućilo dodavanje, oblikovanje i hlađenje uz zadržavanje korisnih svojstava
- svojstvo toplinske provodljivosti i očvršćivanja nakon oformljavanja oblika.

Prilikom prerade i teških uvjeta injekcijskog prešanja, materijali mogu podlijetati promjenama strukture i svojstava. Stoga, jedan od najvažnijih faktora kod injekcijskog prešanja je pravilno podešavanje i programiranje parametara procesa prešanja, koje variraju ovisno o alatu, zahtjevanom proizvodu i vrsti materijala. Da bi se dobio uvid o teškim uvjetima kojima podliježu ovi materijali prilikom procesa injekcijskog prešanja, valja spomenuti da tipičan materijal može biti izložen temperaturama od 150 do 450 °C na nekoliko minuta, pod pritiskom od 14 do 205 MPa te smičnoj sili od 10^5 s^{-1} na više. Injekcijsko prešanje, među komercijalno dostupnim procesima proizvodnje plastike, proces je u kojem se javljaju najveća smična naprezanja. Nadalje, otpresci su potom izloženi i dodatnim naprezanjima uslijed što je moguće bržeg hlađenja otpreska, kako bi se otpresak izbacio iz kalupa prije početka drugog proizvodnog ciklusa. Ciklus hlađenja ima najveći utjecaj na ekonomičnu održivost injekcijskog prešanja.

2.2 PLASTOMERI

Plastomeri su polimeri kojima su makromolekule međusobno povezane isključivo sekundarnim vezama. Iako su sekundarne veze dosta slabe, s obzirom na njihov veliki broj zbog visokog stupnja polimerizacije, njihova ukupna energija je dovoljno velika da takvi polimeri pokazuju dobra svojstva.

Plastomeri su daleko najrašireniji materijali za injekcijsko prešanje.

Mogu se podvrgnuti višestrukim ciklusima zagrijavanja, taljenja, tečenja i hlađenja. Stoga ih je moguće reciklirati.

Čine veliku većinu plastičnih materijala prisutnih na tržištu, koji se koriste u komercijalnim proizvodima i ambalaži za hranu. Među najraširenijim plastomernim materijalima su polipropilen (PP), polietil velike gustoće (HDPE), polistiren (PS), polietilen tereftalat (PET).

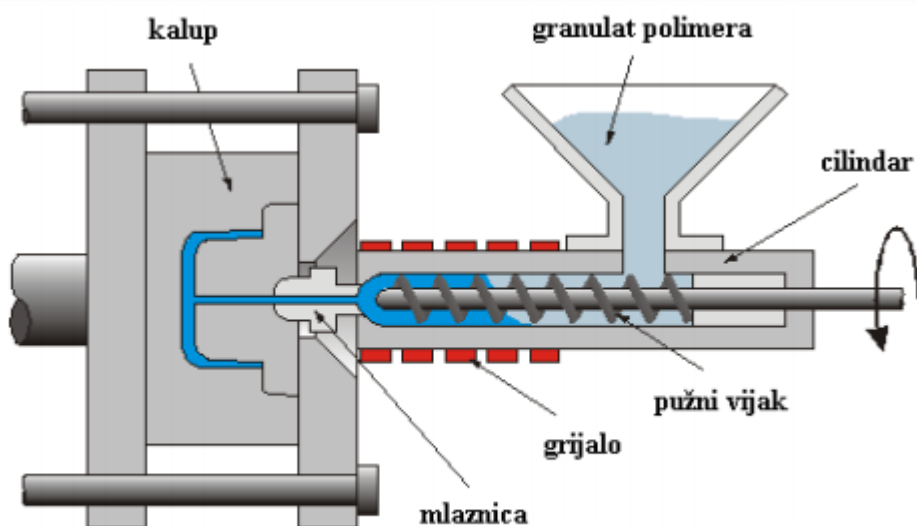
Plastomeri mogu imati pretežno sređenu strukturu (kristalastu) ili pretežno nesređenu strukturu (amorfnu). O kemijskom sastavu polimera ovisi hoće li plastomer imati kristalastu ili amorfnu strukturu.

2.3 SUSTAV ZA INJEKCIJSKO PREŠANJE PLASTOMERNIH TALJEVINA

Osnovni elementi sustava za injekcijsko prešanje plastomernih taljevina su ubrizgavalica, kalup i temperiralo kalupa.

Ubrizgavalica se sastoji od jedinice za pripremu i ubrizgavanje taljevine, jedinice za zatvaranje kalupa, pogonske i jedinice za vođenje te od zaštitnih uređaja. Shematski presjek ubrizgavalice prikazan je na slici 2.2. Funkcije ubrizgavalice su dodavanje, priprema i doziranje homogene taljevine konzistentno i precizno te potom ubrizgavanje određenog volumena taljevine pod visokim tlakom u kalupnu šupljinu. Brojni parametri injekcijskog prešanja u relaciji su s djelovanjem ubrizgavalice. To uključuje određivanje temperature taljenja, prikladnog volumena ubrizgavanja, brzine ubrizgavanja te brzine mješanja vijka.

Važno je da je brzina ubrizgavanja ponovljiva jer i najmanja odstupanja mogu uzrokovati varijacije krajnjeg proizvoda.



Slika 2.2: Shematski presjek ubrizgavalice [3]

Razlikuju se dvije verzije ubrizgavalica. Starija verzija je ubrizgavalica s klipom. Izvedba se temelji na metodi koja se koristi za izradu gume. Metoda je neprikladna za preradu materijala osjetljivih na toplinu uslijed vremenski dugog zadržavanja materijala u grijanom cilindru. Iz navedenog razloga ubrizgavalicu s klipom zamijenila je izvedba ubrizgavalice s pužnim vijkom. Pužni vijak također se i lakše čisti te je manje podložan degradaciji ili skupljanju materijala. [3]

Važni parametri za ubrizgavalicu s pužnim vijkom su:

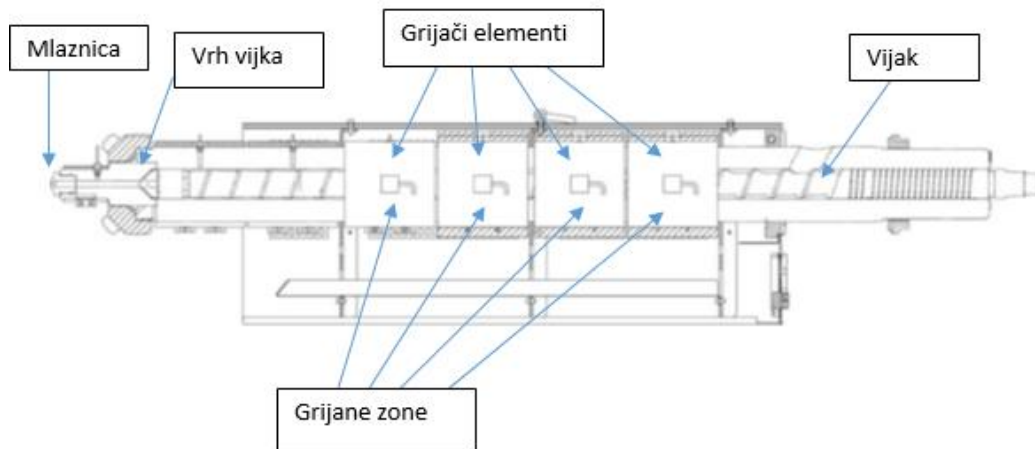
- promjer vijka i omjer promjer/duljina
- kapacitet ubrizgavanja
- brzina rastaljivanja
- količina materijala koja se može rastaliti odjednom (kapacitet taljenja). [3]

Omjer promjera i duljine vijka može se smatrati kao najvažniji parametar pužnog vijka. Duljina vijka obično je 12 do 20, a u novije vrijeme i više duljina promjera. Promjer vijka kreće se u rasponu od 10 do 200 mm. Veći L/D omjer pridonosi boljem taljenju. [3]

Uobičajena brzina ubrizgavanja je 1,5 m/s, pod tlakom od obično 200 N/mm². Temperatura taljevine kreće se u rasponu od 150 do 425 °C, a temperatura kalupne šupljine od -5 do 260 C. Najveća ubrizgavalica ima kapacitet ubrizgavanja od 175 l taljevine odjednom. [3]



Slika 2.3 : Razne izvedbe pužnih vijaka [3]



Slika 2.4: Shematski prikaz ubrizgavalice [3]

Kalup se sastoji od uljevnog sustava, kućišta, šupljine te mehanizma za izbacivanje otpreska. Na uspješan tijek procesa uvelike utječe proračun i dimenzioniranje uljevnog ušća. Ušće može biti točkasto, kružno, plosnato, prstenasto, filmsko, itd., a odabire se prema vrsti i obliku otpreska.

Kalup ima pomičan i nepomičan dio. Nepomičan dio kalupa vezan je na cilindar za taljenje preko uljevnog sustava. Pomičan dio kalupa otvara i zatvara kalupnu šupljinu, a sadrži i mehanizam za izbacivanje otpreska iz kalupa.

Temperiranje kalupa određeno je vrstom plastomera, a ponekad je proizvod potrebno i jače zagrijavati, odnosno hladiti. Visoke temperature zahtjevane su kod prerade konstrukcijskih plastomera. S druge strane, za proizvodnju tankostijenih proizvoda potrebno je hladiti kalup. Kao medij za temperiranje koristi se najčešće voda, kojoj se ovisno o potrebama mogu dodati i sredstva za sniženje ledišta, odnosno povišenje vrelišta.

2.4 CIKLUS INJEKCIJSKOG PREŠANJA

Proizvodnja jednog pojedinačnog otpreska od početka do kraja (izbacivanja otpreska iz kalupa) zove se ciklus injekcijskog prešanja. Postavke ovog ciklusa su od velike važnosti i omogućavaju modernim strojevima za injekcijsko prešanje velikoserijsku ponovljivost ciklusa s velikom preciznošću.

Za plastomerne materijale faze ciklusa su sljedeće:

- alat za injekcijsko prešanje je zatvoren i pričvršćen
- kontrolirana doza materijala ubrizgava se pod visokim tlakom u kalupnu šupljinu pomoću ubrizgavalice
- naknadni tlak se primjenjuje ako je potreban za nadomjestak stezanja materijala
- vrijeme hlađenja traje dok ne otpresak ne skrutne dovoljno za izbacivanje bez distorzija
- ubrizgavalica se pomiče unazad (opcionalno)
- ubrizgavalica je zatvorena za sljedeći ciklus procesa injekcijskog prešanja
- alat se otvara
- otpresak se izbacuje te ciklus počinje ponovo. [2]

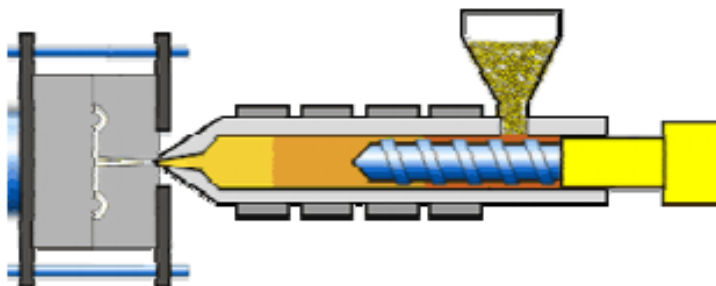
Ukupno vrijeme ciklusa injekcijskog prešanja ovisi i o materijalu i alatu te je visoko varijabilan. Ipak, indikativan prikaz ciklusa injekcijskog prešanja koji prikazuje relativna trajanja svake spomenute faze prikazan je na slici 2.5. Vidljivo je da hlađenje kalupa zauzima najveći udio cjelokupnog ciklusa i time ima ekonomske implikacije u komercijalnoj uporabi.



Slika 2.5: Vremensko trajanje faza tipičnog ciklusa procesa injekcijskog prešanja [2]

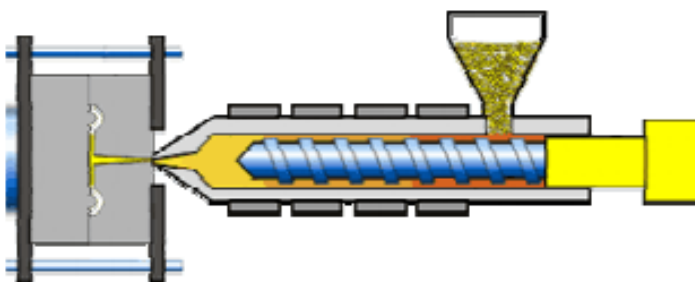
Pojednostavljeno ciklus injekcijskog prešanja može se prikazati u četiri osnovne faze prikazane na slikama od 2.6 do 2.9.

U prvoj fazi materijal nasipan u lijevak okretanjem pužnog vijka ulazi u grijani cilindar za taljenje. Trenje pužnog vijka doprinosi taljenju materijala. Smicanjem se rastaljeni materijal potiskuje do protupovratnog ventila u prednjem dijelu cilindra. (slika 2.6) [4]



Slika 2.6: Faza 1, ciklus injekcijskog prešanja [5]

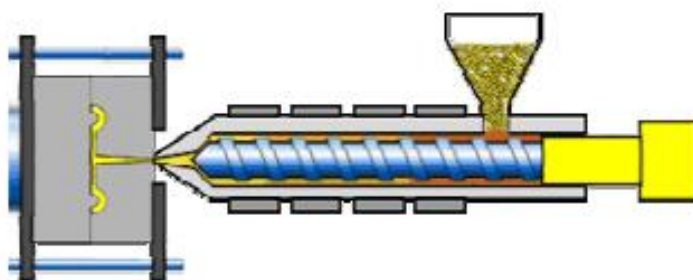
Punjenjem taljevine u prednjem dijelu cilindra, pužni vijak se pomiče unazad, a potom se hidraulički potiskuje naprijed, čime se ubrizgava taljevina u kalupnu šupljinu. (slika 2.7) [4]



Slika 2.7: Faza 2, ciklus injekcijskog prešanja [4]

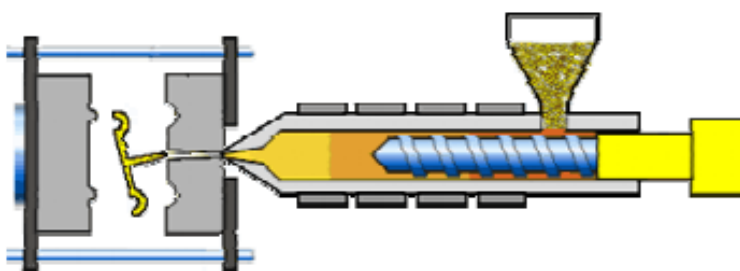
Kalup se steznom napravom drži zatvoren pod tlakom dok se ubrizgani polimer ne ohladi i otvrdne. Vrijeme hlađenja je najduže vrijeme cijelog ciklusa injekcijskog prešanja.

Naknadni tlak djeluje sve dok se mjesto spajanja između kalupne šupljine i uljevnog sustava ne ohladi, a polimer očvrsne (slika 2.8) [4]



Slika 2.8: Faza 3, ciklus injekcijskog prešanja [4]

Po završetku djelovanja naknadnog tlaka, pužni vijak ponovno se počinje okretati i uvlačiti novu dozu polimera u cilindar za taljenje za sljedeći ciklus. Kalup se otvara i otpresak se izbacuje iz kalupne šupljine (slika 2.9). Nakon izbacivanja otpreska, kalup se ponovo zatvara i spreman je za novi proizvodni ciklus injekcijskog prešanja. [4]



Slika 2.9: Faza 4, ciklus injekcijskog prešanja [4]

3 PARAMETRI INJEKCIJSKOG PREŠANJA

Svaki pojedini ciklus injekcijskog prešanja, jednom točno podešen, može se ponavljati i operirati s velikom preciznošću tisućama puta s točnim postavkama stroja. Konzistentnost kalupa za injekcijsko prešanje, a time i proizvodnja identičnih otpresaka, oslanja se na optimiranje i točno postavljanje parametara injekcijskog prešanja.

Velika viskoznost plastomerne taljevine zahtijeva visoki tlak u sustavu prije ubrizgavanja materijala prikladnom brzinom ubrizgavanja. Brzina, uz temperaturu, a time i stupanj smicanja, utječe na viskoznost taljevine. Ekstremno velike sile injekcijskog prešanja zahtijevaju i velike sile stezne naprave sa ciljem sprječavanja otvaranja kalupa tijekom punjenja.

Proces uključuje postavljanje nekih od potrebnih operacija kako je prikazano u tablici 3.1. Krive postavke parametara kao što su doza taljevine, vrijeme ciklusa, temperatura taljenja, temperatura kalupa, temperatura hlađenja i brzina ubrizgavanja mogu uzrokovati nekonzistentnu proizvodnju dijelova u smislu variranja težine otpresaka, nepotpunih ubrizgavanja ili prepunjavanja. Općenito, sila stezanja kalupa ponovo se postavlja kad god je instaliran novi alat te se ne bi trebala mijenjati kod pravilnog rada stroja.

Tablica 3.1: Parametri injekcijskog prešanja povezani s ubrizgavalicom (svijetlo plavo) i kontrolnom jedinicom stroja (tamno plavo) [2]

Temperatura		Temperature ubrizgavalice: Grlo, zone, mlaznica				Temperatura kalupa		
Slabost (Bar)	Tlak ubrizgavanja, max.	Povratni tlak		Naknadni tlak		Sila stezanja	Tlak izbacivanja	
Vrijeme (s)	Vrijeme taljenja	Vrijeme povratnog hoda vijka	Vrijeme ubrizgavanja	Vrijeme držanja	Kašnjenje ubrizgavalice	Vrijeme otvaranja i zatvaranja kalupa	Vrijeme hlađenja	Vrijeme izbacivanja
Težina (cm ³) ili udaljenost (cm)	Težina jedne doze ubrizgavanja	Put vijka	Točka držanja	Rastaljeni jastučić		Udaljenost kalupa od svjetla		Duljina puta izbacivača

Parametri injekcijskog prešanja koji utječu na krajnje stanje i kvalitetu otpreska su mnogobrojni. Na stabilnost procesa i kvalitetu otpreska također utječu i same specifikacije stroja za prešanje. Svojstva injekcijski prešanog dijela ovise o radnom materijalu i uvjetima obrade.

U serijskoj proizvodnji dijelova često dolazi do određenog odstupanja u značajkama kvalitete, kao što su težina, dimenzijska konzistentnost i stanje površine. Odstupanje varira od stroja do stroja te od materijala do materijala. Nadalje i vanjski se utjecaji ili negativni faktori mogu odraziti na kvalitetu injekcijski prešanog dijela. To uključuje promjene u viskoznosti taljevine, temperaturne promjene u kalupu, promjene viskoznosti hidrauličke tekućine te promjene svojstava materijala.

Spomenuti negativni čimbenici mogu nastati kao posljedica pokretanja stroja nakon dugog neaktivnog razdoblja, promjene svojstava materijala uslijed obrade te okolišni utjecaji kao što su temperatura i vrijeme obrade.

3.1 NAJVAŽNIJI PARAMETRI PROCESA INJEKCIJSKOG PREŠANJA

Među mnogobrojnim različitim parametrima procesa, uglavnom se razmatra utjecaj najvažnijih parametara, opisanih u nastavku.

3.1.1 Tlak ubrizgavanja

Tlak ubrizgavanja često se pogrešno zamjenjuje s naknadnim tlakom ili hidrauličkim tlakom ubrizgavalice. Nekađ je okarakteriziran konstantnim, a nekađ ga se smatra promjenjivim, pogrešno ga dovodeći u vezu s vremenom i prostorom. Često se misli kako se tlak ubrizgavanja može podesiti na ubrizgavalici. U praksi je to nemoguće radi otpora taljevine tečenju kroz uljevni sustav u kalupnu šupljinu. Iz tog razloga tlak ubrizgavanja ne može se uzeti kao konstanta tijekom cijelog ciklusa injekcijskog prešanja.

Tlak ubrizgavanja raste od vrijednosti okolnog tlaka na maksimalni tlak. Maksimalni tlak moguće je predvidjeti računalnom simulacijom. Za procjenjivanje tlaka ubrizgavanja potrebno je raspolagati podacima o minimalnom, maksimalnom ili raspoloživom tlaku ubrizgavanja.

Tlak ubrizgavanja trebao bi biti dovoljno visok za brzo popunjavanje kalupne šupljine, a s druge strane dovoljno nizak kako bi se proizveli otpresci s niskim zaostalim naprezanjima te izbjegle poteškoće s izbacivanjem otpreska iz kalupa.

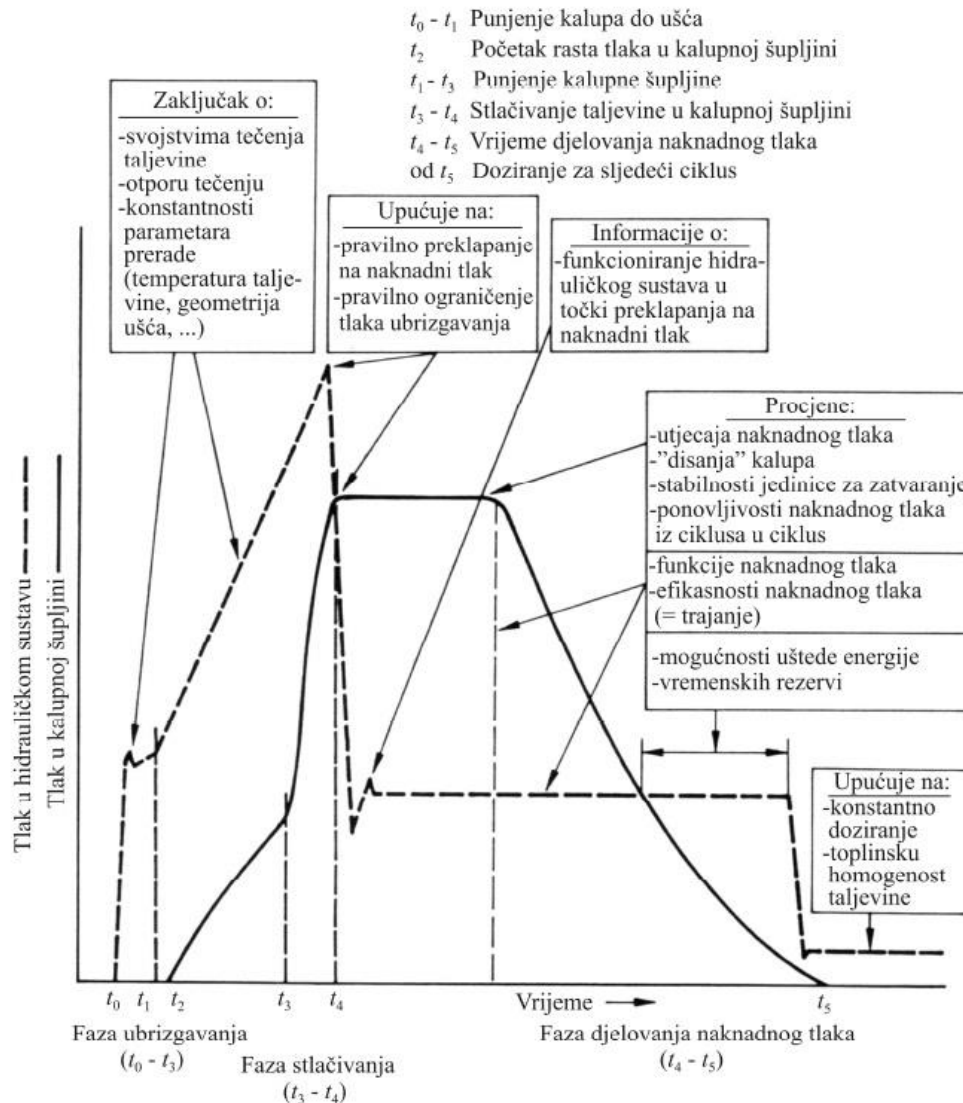
3.1.2 Hidraulički tlak u jedinici za ubrizgavanje

Hidraulički tlak u jedinici za ubrizgavanje nužan je za savladavanje otpora taljevine tečenju u mlaznici ubrizgavalice, uljevnom sustavu te kalupnoj šupljini.

Tijek hidrauličkog tlaka podudara se s tijekom tlaka materijala na vrhu pužnog vijka. Visoki otpor materijala tečenju uzrokuje nagli porast hidrauličkog tlaka u fazi obujamnog punjenja kalupne šupljine. Na hidraulički tlak utječe viskoznost hidrauličkog ulja, koja ovisi o temperaturi. Ubrižgavalicu je potrebno zagrijati kako bi hidrauličko ulje doseglo svoju radnu temperaturu.

Veće promjene hidrauličkog tlaka prilikom ubrizgavanja ukazuju na poteškoće prilikom popunjavanja kalupne šupljine. Stoga je preporuka provjeravanje hidrauličkog tlaka tijekom cijelog ciklusa prešanja.

Prilikom faze ubrizgavanja profil tlaka rastaljenog materijala na vrhu pužnog vijka sličan je profilu hidrauličkog tlaka. U fazi djelovanja naknadnog tlaka, dolazi do bitnih promjena u ovim profilima. Hidraulički tlak daje uvid u zbivanja tijekom faze punjenja kalupne šupljine, ali ne prikazuje i tijek naknadnog tlaka te tlaka u kalupnoj šupljini.



Slika 3.1.: Informacije dobivene praćenjem tlakova u hidrauličkom sustavu i kalupnoj šupljini [5,6]

3.1.3 Tlak u kalupnoj šupljini

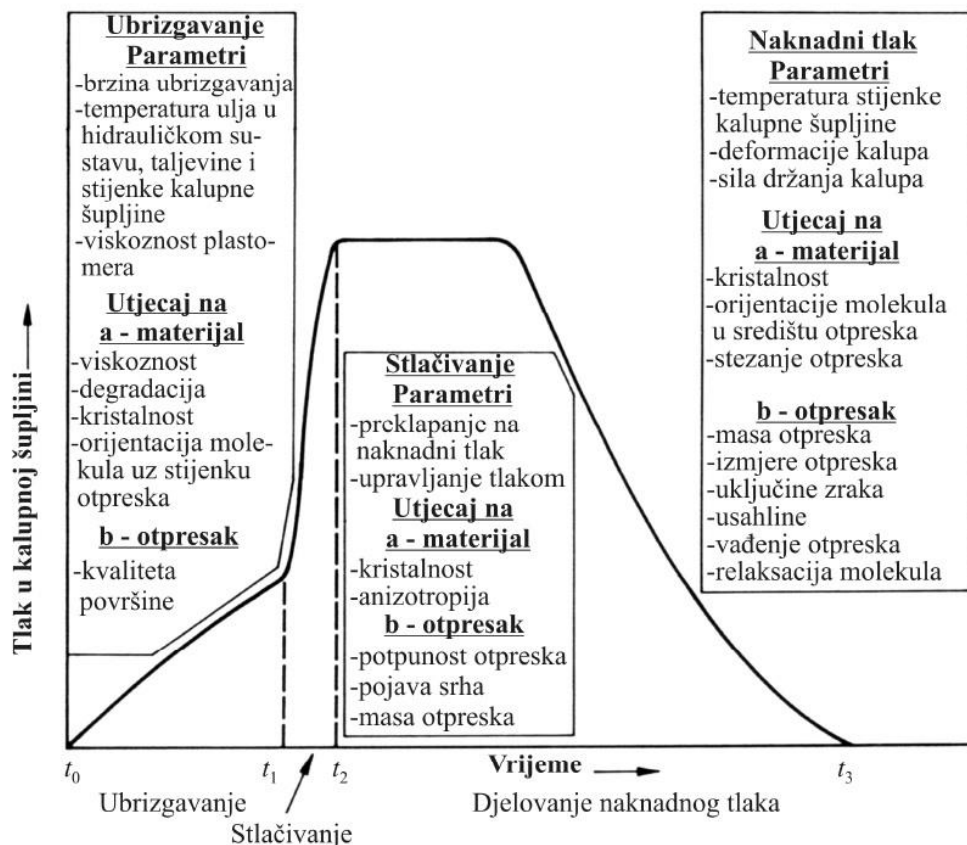
Za učinkovito vođenje procesa injekcijskog prešanja od velike je važnosti analiza samog procesa. Tlak u kalupnoj šupljini središnja je zavisna varijabla analize procesa. Osjetilo tlaka može biti smješteno blizu ili dalje od ušća u kalupnoj šupljini, a o položaju ovisi izmjereni profil tlaka kalupne šupljine.

Tijekom faze ubrizgavanja osjetila ne bilježe tlak sve do trenutka kad rastaljeni materijal ne dođe u kontakt s osjetilom. U fazi djelovanja naknadnog tlaka, tlak u kalupnoj šupljini može se mjeriti samo do trenutka kad se stijenka otpreska uslijed stezanja materijala odvoji od stijenke kalupne šupljine na kojoj se nalazi osjetilo tlaka.

Osjetilo tlaka preporuča se dakle postaviti blizu ušća kako bi prikupilo najkvalitetnije podatke o otpresku. Takvim položajem osjetila, vrijeme u kojem je moguće mjeriti tlak je najdulje, s

obzirom da je tu najmanje stezanje otpreska uslijed djelovanja naknadnog tlaka. Iako potrebna, osjetila se u praksi ipak rijetko upotrebljavaju.

Utjecaj tlaka u kalupnoj šupljini na svojstva dobivenog otpreska te sami tijek tlaka prikazani su na slici 3.2.



Slika 3.2.: Utjecaj faza tijekom tlaka u kalupnoj šupljini na otpresak [5,6]

Krivulja tlaka u kalupnoj šupljini može se podijeliti na tri faze:

1. Obujamno punjenje kalupne šupljine (faza punjenja)
2. Stlačivanje taljevine (faza stlačivanja)
3. Održavanje plastomernog materijala tijekom očvršćivanja pri povišenom-naknadnom tlaku (faza djelovanja naknadnog tlaka).

Faza punjenja najviše utječe na pojavnost otpreska. Tlak u fazi punjenja savladava otpor taljevine tečenju kroz uljevni sustav i kalupnu šupljinu, a nema veći utjecaj na kvalitetu otpreska. Veći utjecaj na kvalitetu otpreska imaju tlakovi u fazi stlačivanja i fazi djelovanja naknadnog tlaka. Faza djelovanja naknadnog tlaka posebno utječe na dimenzijsku stabilnost otpreska.

Profil tlaka u kalupnoj šupljini može ukazati na tipične greške procesa injekcijskog prešanja. Izražena vršna vrijednost tlaka u fazi stlačivanja ukazuje na ozbiljne greške u procesu. Vrlo često do grešaka dolazi uslijed krivo podešene točke preklapanja na naknadni tlak.

Krivim podešavanjem točke preklapanja na naknadni tlak dolazi do pojave srha na otpresku te napetostima uslijed prekomjernog stlačivanja taljevine. Rezultat toga je smanjena dimenzijska stabilnost otpreska te variranje postignute težine otpresaka od ciklusa do ciklusa.

3.1.4 Preklapanje na naknadni tlak

Četiri su pristupa prema kojima se može podešavati točka preklapanja na naknadni tlak:

- preklapanje ovisno o vremenu
- preklapanje ovisno o prijašnjem putu pužnog vijka
- preklapanje ovisno o tlaku u kalupnoj šupljini
- preklapanje ovisno o sili držanja kalupa.

U praksi se točka preklapanja na naknadni tlak najčešće podešava ovisno o prijašnjem putu pužnog vijka. Kod ovog pristupa, preklapanje na naknadni tlak odvija se pri istoj popunjenosti kalupne šupljine u svakom ciklusu.

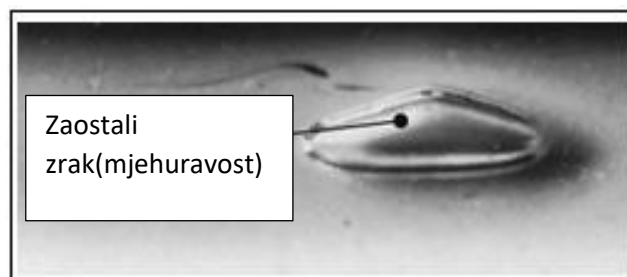
Često se odabire pogrešna točka preklapanja na naknadni tlak, pa se ubrizgavanje može odvijati s prekasnim preklapanjem, s preranim preklapanjem te s optimalnim preklapanjem.

Ubrizgavanje se može odvijati i bez preklapanja na naknadni tlak, što je primjenjivo u slučajevima kad je konačni potrebni tlak u kalupnoj šupljini blizak tlaku tijekom ubrizgavanja, kao posljedica malog ušća kalupa ili velikog omjera put tečenja/debljina stijenke kod otpreska.

3.1.5 Naknadni tlak (naknadni tlak u kalupnoj šupljini)

Pri hlađenju otpreska greškom može doći do stezanja materijala. Kada se postigne željeni tlak u kalupu, smanji se tlak ubrizgavanja na tzv. naknadni tlak. Ovaj tlak u završnoj fazi ima funkciju punjenja preostale mase i popunjavanja kalupa zbog hlađenja i stezanja materijala.

Uz minimizaciju stezanja i vitoperenja, naknadnim tlakom sprječavaju se i pojave ostalih grešaka na otpresku, kao što su mjerhuravost i usahline (slika 3.3.).



Slika 3.3.: Otpresak s mjehurićem [7]

Faza djelovanja naknadnog tlaka počinje od točke preklapanja s tlaka ubrizgavanja i traje sve do kraja djelovanja naknadnog tlaka kad dolazi do pečačenja ušća. U fazi djelovanja naknadnog tlaka, mala je korelacija između tlaka u hidrauličkom sustavu i tlaka u kalupnoj šupljini.

Iznos i trajanje naknadnog tlaka bitno utječu na dimenzijsku stabilnost i optička svojstva otpreska. Određivanje iznosa naknadnog tlaka temelji se na mjerenju izmjera otpreska te na vizualnom pregledu.

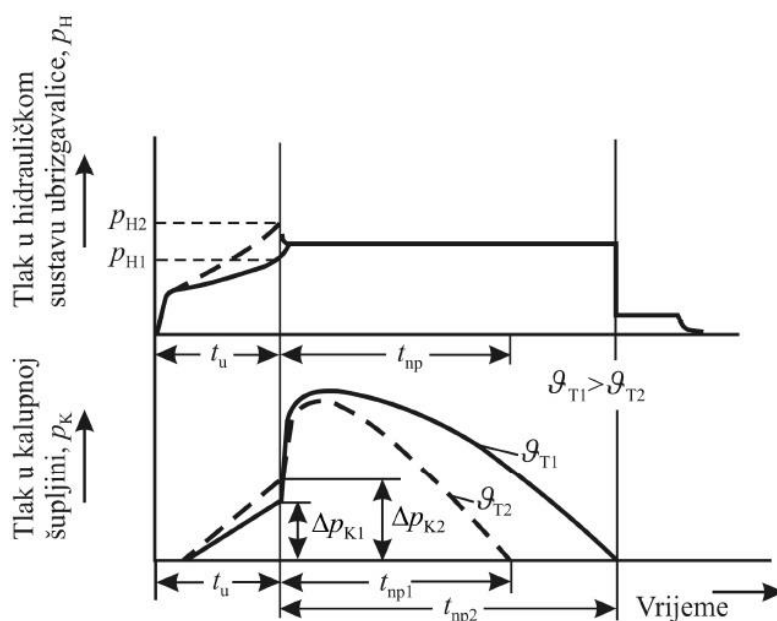
Utjecaj naknadnog tlaka na proces ubrizgavanja prikazan je u tablici 3.2.

Tablica 3.2: Djelovanje naknadnog tlaka [7]

Naknadni tlak	Posljedice	
prenizak	mjehuravost, udubljenje	Veliko kolebanje odstupanja i skupljanja, manja težina i premali proizvod
Prekratko djelovanje	Niži stupanj punjenja kalupa	
Predugo djelovanje	-	Neekonomično, velika težina i preveliki proizvodi, velike napetosti
previsok	Prepunjeno	

3.1.6 Temperatura taljevine

Temperatura taljevine ima izravan utjecaj na termodinamička svojstva plastomerne taljevine. To su primjerice viskoznost, entalpija i specifični obujam. Time temperatura taljevine izravno utječe i na određene parametre injekcijskog prešanja. Snižavanjem temperature taljevine pada i tlak u kalupnoj šupljini (slika 3.5) Također se skraćuje i vrijeme očvršćivanja ušća tijekom kojeg se može utjecati na svojstva otpreska. Istodobno se skraćuje i vrijeme ciklusa injekcijskog prešanja.



Slika 3.5: Utjecaj temperature taljevine na tijek hidrauličkog tlaka i tlaka u kalupnoj šupljini: θ_T - temperatura taljevine, t_u - vrijeme ubrizgavanja [5,6]

3.1.7 Temperatura stijenke kalupne šupljine

Temperatura stijenke kalupne šupljine zavisna je procesna varijabla. Predstavlja glavni parametar koji utječe na svojstva otpreska, proizvodnost procesa, točnost i preciznost izmjera otpreska, ponovljivost procesa i drugo.

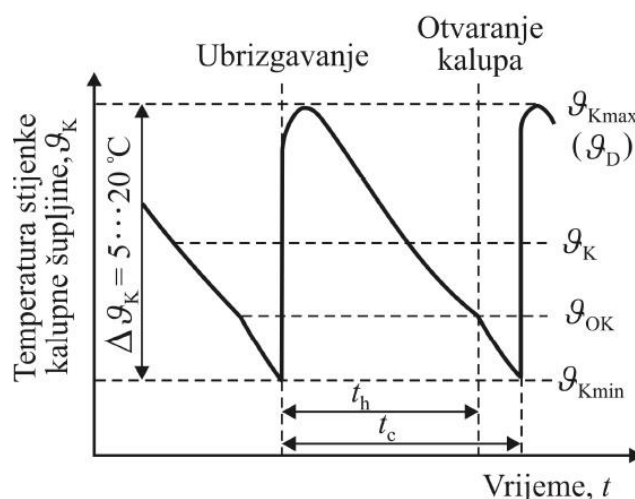
Kada je riječ o temperaturi stijenke kalupne šupljine, zapravo se radi o temperaturnom polju koje se ciklički mijenja.

Kad plastomerna taljevina dođe u doticaj sa stijenkom kalupne šupljine, uspostavlja se maksimalna temperatura u ciklusu, dodirna temperatura (θ_D). Potom, uslijed djelovanja medija

za temperiranje, a i okoline, temperatura stijenke kalupne šupljine pada sve do trenutka otvaranja kalupa. Od tog trenutka na stijenci kalupne šupljine uspostavlja se temperatura otvaranja kalupa (ϑ_{OK}). Slijedi vađenje otpreska iz kalupne šupljine tijekom kojeg temperatura stijenke kalupne šupljine dodatno pada na svoj minimum (ϑ_{Kmin})

U analitičkim i numeričkim proračunima rabi se aritmetička sredina između dodirne temperature i temperature stijenke u trenutku otvaranja kalupa. Ta je temperatura propisana i od strane proizvođača polimernih materijala.

Također valja napomenuti kako spomenute temperature stijenke kalupne šupljine vrijede samo za određenu točku na stijenci kalupne šupljine. Tijekom procesa injekcijskog prešanja u kalupnoj se šupljini na različitim mjestima postižu i različita toplinska stanja, pa tako u kalupnoj šupljini postoji također prostorno polje temperatura stijenke kalupne šupljine.



Slika 3.6.: Temperaturno polje u kalupu: ϑ_K - temperatura stijenke kalupne šupljine, ϑ_D – dodirna temperatura, ϑ_{OK} - temperatura otvaranja kalupa, t_c - vrijeme ciklusa injekcijskog prešanja, t_h - vrijeme hlađenja otpreska [5,6]

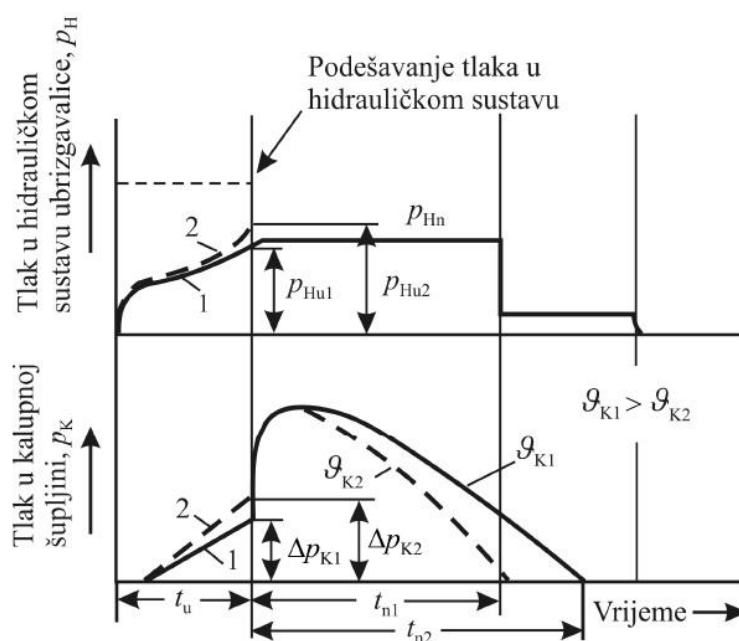
Temperatura stijenke kalupne šupljine, općenito je jedan od najutjecajnijih parametara injekcijskog prešanja za postizanje željenih svojstava otpresaka. Od velike je važnosti trajno održavanje postignute temperature stijenke kalupne šupljine.

Ipak, temperatura stijenke kalupne šupljine, slučajna je varijabla, koja ovisi o nizu statističkih i dinamičkih čimbenika. U statističke čimbenike ubrajaju se promjer i raspored kanala za temperiranje te toplinska svojstva materijala stijenke kalupne šupljine. Dinamički čimbenici odnose se na temperaturu taljevine i okoline, brzinu i temperaturu medija za temperiranje, na vrijeme hlađenja i vrijeme ciklusa injekcijskog prešanja. Spomenuti se čimbenici ciklički mijenjaju tijekom ciklusa. Prema tome, temperaturom stijenke kalupne šupljine ne može se izravno upravljati.

Temperatura stijenke kalupne šupljine mjeri se odgovarajućim osjetilima temperature. Može se regulirati izravno podesivim parametrima.

Ova temperatura vrlo malo utječe na tijek tlaka u kalupnoj šupljini u fazi punjenja radi kratkog vremena hlađenja unutar te faze. S druge strane, temperatura stijenke kalupne šupljine znatno utječe na tijek tlaka u fazi djelovanja naknadnog tlaka, s obzirom da se tim parametrom definiraju uvjeti hlađenja i očvršćivanja otpreska (slika 3.7.).

Ekonomično poboljšanje kvalitete u injekcijskom prešanju nemoguće je bez dobro podešene temperature u kalupnoj šupljini. Čak i uz skuplji sustav kontrole ili podešavanja procesa ubrizgavanja, negativni utjecaj nezadovoljavajućih temperatura u kalupnoj šupljini ne može se izbalansirati.



Slika 3.7.: Utjecaj temperature stijenke kalupne šupljine na tijek tlaka u hidrauličkom sustavu ubrizgavalice i tlaka u kalupnoj šupljini [5,6]

3.1.8 Temperatura medija za temperiranje

Medij za temperiranje ima ulogu predaje ili preuzimanja topline od kalupa, time se temperatura medija strujanjem kanalima za temperiranje mijenja. Razlikuju se ulazna i izlazna temperatura medija, a njihova aritmetička sredina predstavlja temperaturu medija za temperiranje (ϑ_M). To je izravno podešivi parametar, kojime je moguće podešavati temperaturno polje u kalupu. Kalup je moguće spojiti ili na temperiralo koje održava željenu ulaznu temperaturu medija, ili na vodovodnu mrežu, u kojem se slučaju kalupu toplina može samo odvoditi.

3.1.9 Brzina medija za temperiranje

Učinkovito temperiranje kalupa izraženo je izmjenom topline između stijenke kalupne šupljine i medija za temperiranje. Temperaturni gradijent podijeljen je na dva dijela: gradijent kroz materijal kalupne šupljine ovisan o toplinskoj prohodnosti materijala i gradijent na stijenci kanala za temperiranje ovisan o protoku medija za temperiranje.

Strujanje medija može biti laminarno, prijelazno i turbulentno. Za niske brzine medija strujanje je laminarno. Mediji za temperiranje u pravilu imaju loša svojstva toplinske vodljivosti pa je izmjena topline neefikasna.

Povišenjem brzine strujanja medija za temperiranje raste i brzina izmjene topline na stijenka kanala za temperiranje sve dok strujanje ne prijeđe u turbulentno strujanje. Tada se vektoru brzine strujanja medija dodaje i vektor okomit na smjer kanala za temperiranje, što rezultira naglim povećanjem učinkovitosti izmjene topline.

Strujanje se općenito opisuje Reynoldsovim brojem, a učinkovita izmjena topline zahtijeva Reynoldsov broj veći od 10 000.

3.1.10 Brzina ubrizgavanja (vrijeme ubrizgavanja)

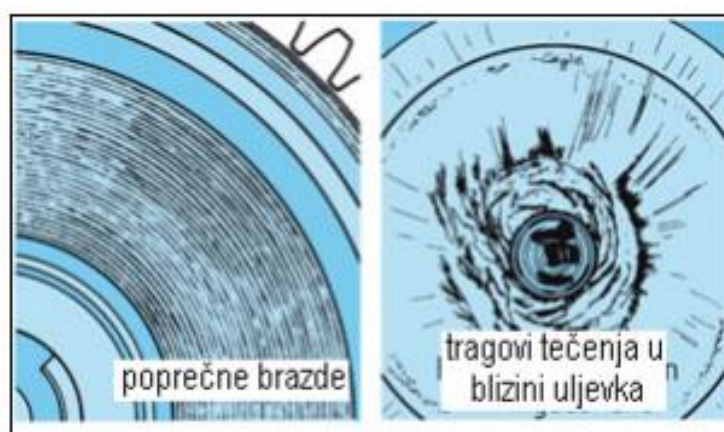
Proces punjenja kalupa ovisi o brzini ubrizgavanja i punjenja kalupa. Brzina ubrizgavanja je brzina čestica mase pri ubrizgavanju, a ovisi o tlaku ubrizgavanja. Brzina punjenja je brzina kojom masa popunjava kalup, a ovisi o otporu taljevinje tečenju unutar kalupa. Što je veći otpor tečenju to je potreban veći tlak ubrizgavanja.

Početna brzina ubrizgavanja, a time i brzina punjenja trebale bi biti što je moguće veće, kako bi se kalup što brže napunio materijalom pri što ujednačenijoj temperaturi.

Pri manjim brzinama punjenja nastaju veće temperaturne razlike između prethodno i trenutno ubrizganih dijelova rastaljene mase. Hladnija masa ima veću viskoznost i zahtijeva veći tlak ubrizgavanja. Pukotine već ohlađene mase pri daljnjem ubrizgavanju uzrokuju pomicanje materijala i stvaranje poprečnih brazdi okomito na smjer tečenja (slika 3.8).

Prevelike brzine punjenja uzrokuju oštro skretanje i nagle poprečne promjene, a moguća je i pojava krhotina.

Za tankostijene dijelove optimalna brzina punjenja viša je nego za proizvode debljih stijenki.



Slika 3.8.: Prevelika brzina ubrizgavanja [8]

Utjecajna brzina kod procesa injekcijskog prešanja je brzina kretanja pužnog vijka. Što je manji poprečni presjek toka taljevine u odnosu na površinu pužnog vijka to je veća brzina punjenja.

Vrijeme ubrizgavanja obrnuto je proporcionalno brzini ubrizgavanja. Vrijeme ubrizgavanja sastoji se od vremena potrebnog za popunjavanje kalupne šupljine rastaljenim plastomerom, vremena stlačivanja taljevine i vremena održavanja maksimalnog tlaka u kalupnoj šupljini. To je vrijeme u pravilu kratko, no ima bitan utjecaj na kvalitetu dobivenog otpreska.

Kratko vrijeme ubrizgavanja uzrokuje veliki pad tlaka. Produljenje vremena ubrizgavanja smanjuje efektivan presjek kroz kojeg teče taljevina uslijed očvršćivanja, što opet rezultira većim padom tlaka.

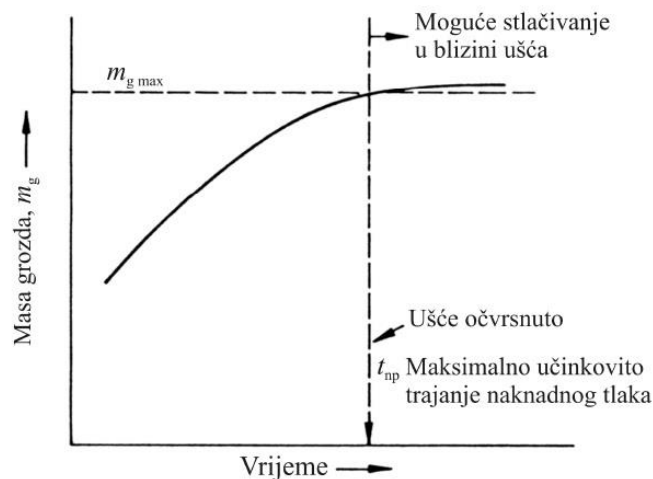
Porastom brzine ubrizgavanja raste i tlak u hidrauličkom sustavu što se pripisuje porastu otpora taljevine tečenju u mlaznici ubrizgavalice i ušću kalupa. Pad tlaka uslijed punjenja šupljine kalupa, mjeren u blizini ušća, veći je pri nižoj brzini ubrizgavanja. To je posljedica istodobnog hlađenja otpreska, kojim se povisuje viskoznost taljevine i smanjuje efektivan presjek tečenja taljevine.

Tablica 3.3: Utjecajne veličine na proces ubrizgavanja i kvalitetu proizvoda [8]

Utjecajne veličine		Način djelovanja
Pritisak ubrizgavanja	previsok	pritisak u alatu velik, srh na proizvodu
	prenizak	lagano punjenje kalupa, slaba mjesta u i na proizvodu
	djeluje prekratko	lagano punjenje, prelagani proizvod
	djeluje predugo	težak proizvod, napetosti u proizvodu
Brzina ubrizgavanja, odnosno brzina punjenja	previsoka	manja orijentacija molekula, stvaranje slobodnog mlaza, izgaranja na proizvodu
	premala	slabo zavarivanje strujne mase, šupljikavost, velika temperaturna razlika u masi

3.1.11 Vrijeme djelovanja naknadnog tlaka

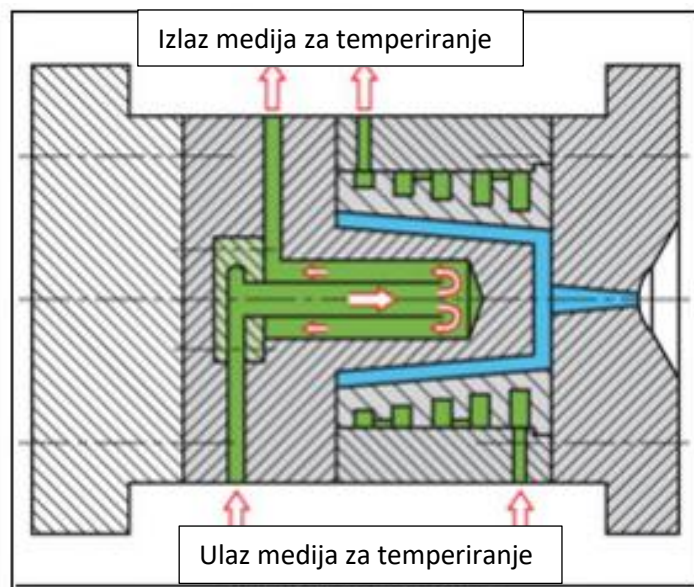
Kada se govori o vremenu djelovanja naknadnog tlaka, najčešće se govori o vremenu potrebnom za očvršćivanje ušća. Druga je mogućnost vrijeme djelovanja naknadnog tlaka dovesti u vezu s masom otpreska. Sustavnim mjerenjem može se uočiti kako nakon određenog vremena, produljenje vremena djelovanja naknadnog tlak više ne utječe na povećanje mase proizvoda (slika 3.9). Prema tome, moguće je odrediti optimalno vrijeme djelovanja naknadnog tlaka.



Slika 3.9: Određivanje optimalnog vremena djelovanja naknadnog tlaka [5,6]

3.1.12 Vrijeme hlađenja otpreska

Kod termoplasta, glavna svrha kalupnog sustava je smanjiti vrijeme ciklusa prešanja te smanjiti toplinske razlike u hlađenju kalupa i otpreska. Hlađenje kalupa esencijalno je za smanjenje troškova i kontrolu kvalitete. Ujednačeno hlađenje doprinosi boljoj kvaliteti otpreska sprječavajući diferencijalna skupljanja materijala, visoka zaostala naprezanja te probleme s otvaranjem kalupa. Stoga je pri konstruiranju kalupa za injekcijsko prešanje, obraćanje pozornosti na veličinu i izgled kanala za temperiranje od najveće važnosti. Primjer sustava kanala za temperiranje prikazan je na slici 3.10.



Slika 3.10.: Primjer sustava kanala za temperiranje [8]

Vrijeme hlađenja između ubrizgavanja materijala i izbacivanja otpreska zauzima najmanje 60% ciklusa injekcijskog prešanja. Time vrijeme hlađenja ima vitalnu ulogu u učinkovitosti, kontroli kvalitete i produktivnosti procesa injekcijskog prešanja. Dok smanjenje vremena hlađenja doprinosi ekonomičnoj održivosti proizvodnje, nužno je zadržati i ujednačen proces hlađenja za dobivanje kvalitetnih otpresaka.

Važnost faze hlađenja dovela je do brojnih istraživanja na tu temu s ciljem pokušaja ubrzavanja procesa izmjene topline. Za istovremeno prešanje različitih materijala, vrijeme hlađenja ima još bitniju ulogu, s obzirom da postavljanjem jednog materijala na drugi nastaje daljnja toplinska barijera između ubrizganih rastaljenih materijala (polimerni materijali niske toplinske vodljivosti) i visoko toplinski vodljivih alatnih čelika.

Učinkoviti sustav hlađenja odražava se i na dimenzijsku točnost i stabilnost otpreska. Stoga se temperaturne varijacije u rashladnom ciklusu moraju izbjegavati kada god je to moguće. Najjednostavniji sustavi hlađenja koriste vodu, a limitirani su točkom leđišta i vrelišta vode. U slučaju da su potrebne više temperature, sustavi na bazi ulja mogu raditi i do 350 °C. Za niske temperature potrebno je koristiti sustave s glikolom.

Važno je uzeti u obzir utjecaj debljine stijenke otpreska na hlađenje otpreska. Udvostručenje debljine stijenke može imati četverostruki učinak na vrijeme hlađenja uslijed niske toplinske vodljivosti većine polimernih materijala. Kao pravilo, kako se povećava debljina stijenke, vrijeme hlađenja raste za faktor 1².

Kanali za temperiranje napravljeni su tijekom proizvodnje kalupa i na stacionarnom i pokretnom dijelu kalupa kako bi hlađenje bilo ujednačeno s obje strane linije spajanja. Neusklađene temperature na površini kalupa, osim što utječu na injekcijsko prešanje otpreska, mogu uzrokovati i proširenje jedne strane kalupa u odnosu na drugu stranu, ometajući tako pravilan rad.

Prevelika razlika u temperaturi može otežavati zatvaranje kalupa, a ne bi trebala biti veća od 10°C stupnjeva. Kanale za temperiranje najbolje je smjestiti što bliže kalupnoj šupljini, a da ne utječu na integritet kalupa.

Za preciznu izvedbu kanala za temperiranje potrebno je uzeti u obzir čimbenike poput:

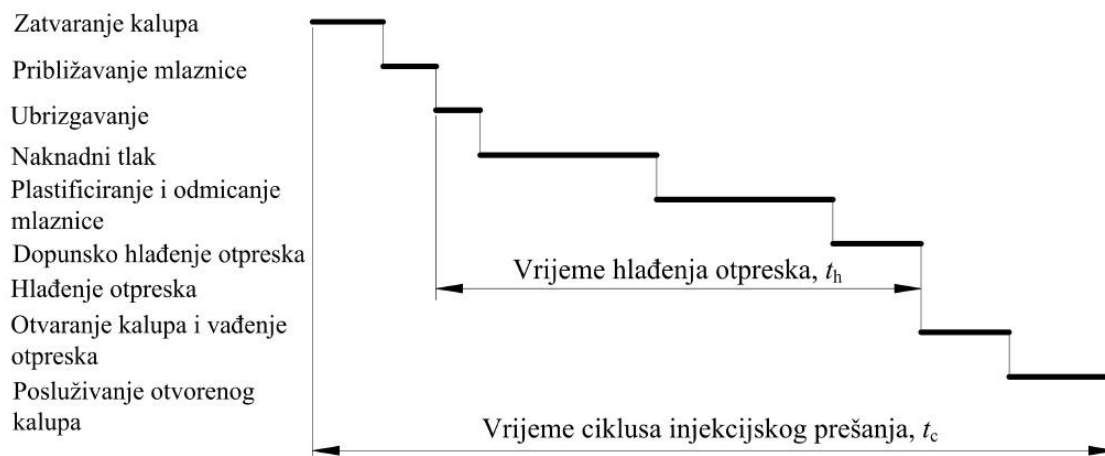
- lokacija (dubina)
- veličina kanala (dubina i širina)
- vrsta kanala za temperiranje
- izgled i spoj
- duljina kruga za temperiranje
- brzina protoka medija za temperiranje

Kako se kanali za temperiranje udaljavaju od šupljine tako se smanjuje efikasnost odvođenja topline. Povećanjem razmaka između kanala povećati će se i neujednačenost hlađenja.

Normom DIN 24450 vrijeme hlađenja otpreska definirano je kao vrijeme koje započinje naredbom „ubrizgavanje“, a završava naredbom otvaranje kalupa“. Po toj definiciji, vrijeme hlađenja obuhvaća operacije ubrizgavanja, djelovanja naknadnog tlaka, plastificiranja i vraćanja mlaznice u početni položaj (slika 3.11).

Često je potrebno predvidjeti i osigurati dodatno vrijeme za hlađenje otpreska, s obzirom da se sve operacije odvijaju i završe prije nego li se otpresak ohladi do temperature postojanosti oblika.

Što je veća debljina stijenke i težina otpreska, to je vrijeme hlađenja duže.



Slika 3.11.: Analiza ciklusa injekcijskog prešanja [5,6]

3.1.13 Vrijeme ciklusa injekcijskog prešanja

Vrijeme ciklusa injekcijskog prešanja zbroj je vremena hlađenja otpreska i pomoćnih vremena. Vrijedi formula:

$$t_c = t_h + t_p \quad (3.1.)$$

gdje su t_c - vrijeme ciklusa (s), t_p - pomoćno vrijeme (s).

Pomoćno vrijeme ciklusa injekcijskog prešanja čine:

- vrijeme podmazivanja i čišćenja kalupa
- vrijeme posluživanja otvorenog kalupa
- vrijeme zatvaranja kalupa
- vrijeme ukapčanja
- vrijeme približavanja mlaznice
- vrijeme otvaranja kalupa
- vrijeme vađenja otpreska iz kalupne šupljine.

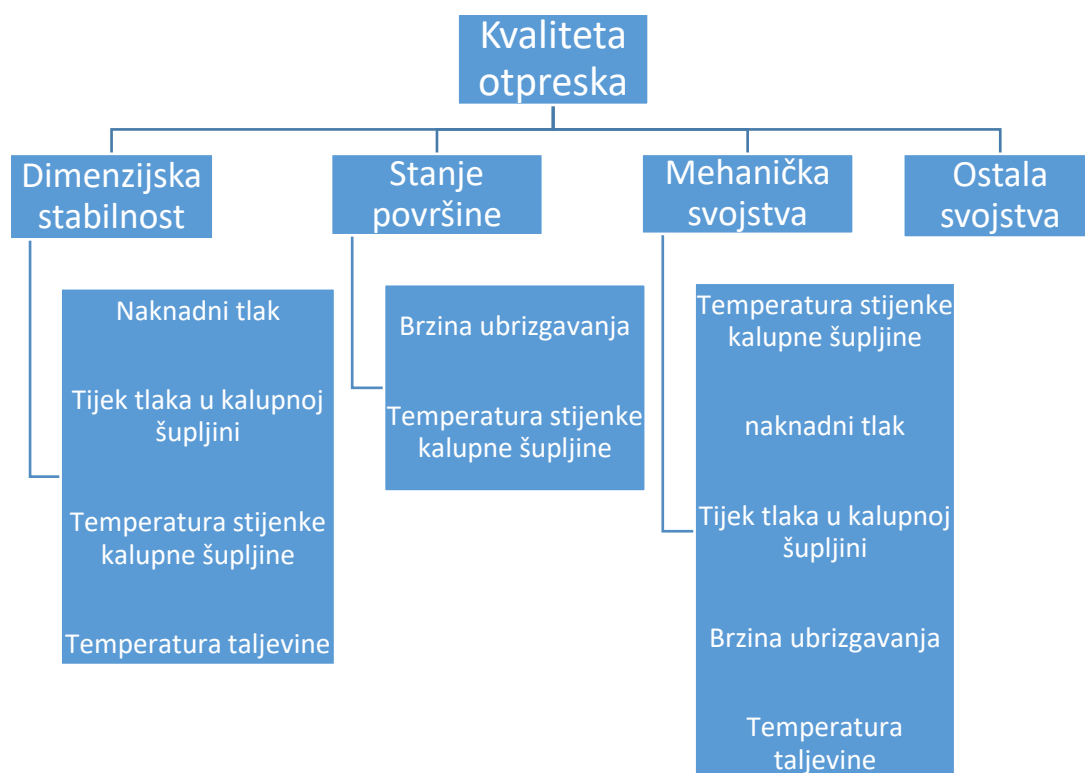
U već uhodanim ciklusima, pomoćno vrijeme čine vremena zatvaranja kalupa, otvaranja kalupa i izbacivanja otpreska iz kalupa.

3.2 UTJECAJ PARAMETARA INJEKCIJSKOG PREŠANJA NA SVOJSTVA OTPRESAKA

Proizvodnja otpresaka najbolje kvalitete, u minimalnom trajanju ciklusa, s minimalnim utroškom energije i materijala moguća je samo za optimalan sustav, a to znači pri optimalno podešenim parametrima.

Kako bi se odredila kvaliteta dobivenih otpresaka, razmatraju se sljedeće značajke kvalitete: dimenzijska stabilnost, stanje površine otpreska, mehanička, unutrašnja te ostala svojstva.

Slika 3.12 prikazuje vezu pojedinih parametara procesa s kvalitetom otpreska.



Slika 3.12.: Veza pojedinih parametara procesa s kvalitetom otpreska [6]

3.1.1 Dimenzijska stabilnost otpreska

Svi opisani parametri imaju izravan ili posredan utjecaj na dimenzijsku stabilnost otpreska, što je prikazano u tablici 3.3. Ipak, na dimenzijsku stabilnost otpreska najviše utjecaja ima faza djelovanja naknadnog tlaka.

Tablica 3.3: Utjecaj parametara injekcijskog prešanja na dimenzije otpreska [6]

Parametar	Utjecaj	Dimenzije otpreska
Porast temperature taljevine	Povećanje volumena	smanjenje
Porast temp. stijenke kalupne šupljine	Viša ϑ_{OK}	smanjenje
Porast brzine ubrizgavanja	Bolji prijenos naknadnog tlaka u kalupnu šupljinu	povećanje
Porast naknadnog tlaka	Bolja kompenzacija stezanja, bolje stlačivanje taljevine	povećanje
Dulje vrijeme djelovanja naknadnog tlaka	Isto kao i prethodno (prije pečačenja ušća)	povećanje
	Nakon pečačenja ušća	-
Veće deformacije kalupa uslijed tlaka u kalupnoj šupljini	Disanjem kalupa omogućeno bolje djelovanje naknadnog tlaka	povećanje
Veći presjek ušća	Posredni utjecaj (ovisi o brzini ubrizgavanja, naknadnom tlaku i temperaturi taljevine)	povećanje

4 KALUP

Kalup je namjenski dio sustava za injekcijsko prešanje plastomera i u pravilu služi proizvodnji jedne vrste proizvoda. S potrebom za fleksibilizacijom preradbenih sustava, ulažu se napor i kako bi se omogućilo automatsko mijenjanje dijelova koji oblikuju kalupnu šupljinu u okviru jednog kućišta (kazetni umetci).

Osnovni zadaci kalupa su: prihvaćanje taljevine i njeno hlađenje do postizanja temperature postojanosti oblika otpreska, potiskivanje otpreska iz kalupne šupljine i ciklički rad SIP-a. Osnovni elementi kalupa su: uljevni sustav, kalupna šupljina, sustav za izbacivanje otpreska i vođenje, elementi temperiranja (kanali za temperiranje, zatici za temperiranje itd.) i kućište.

Iako je kalup vitalni dio sustava za injekcijsko prešanje, potrebno je naglasiti da mu se ne posvećuje dovoljno pozornosti.

Od samih početaka ljudskih izrađevina oruđa i alata, kamene oštrice pa sve do sredine 20. stoljeća, temelj alatničarstva bilo je iskustvo majstora. Od sedamdesetih godina 20. stoljeća počelo se odgovarati na potrebu za boljim razumijevanjem zbivanja u kalupu. Tada počinju prve simulacije reoloških, toplinskih i mehaničkih zbivanja unutar kalupa. Od tada nadalje trend analiziranja zbivanja u kalupu trajno se širi.

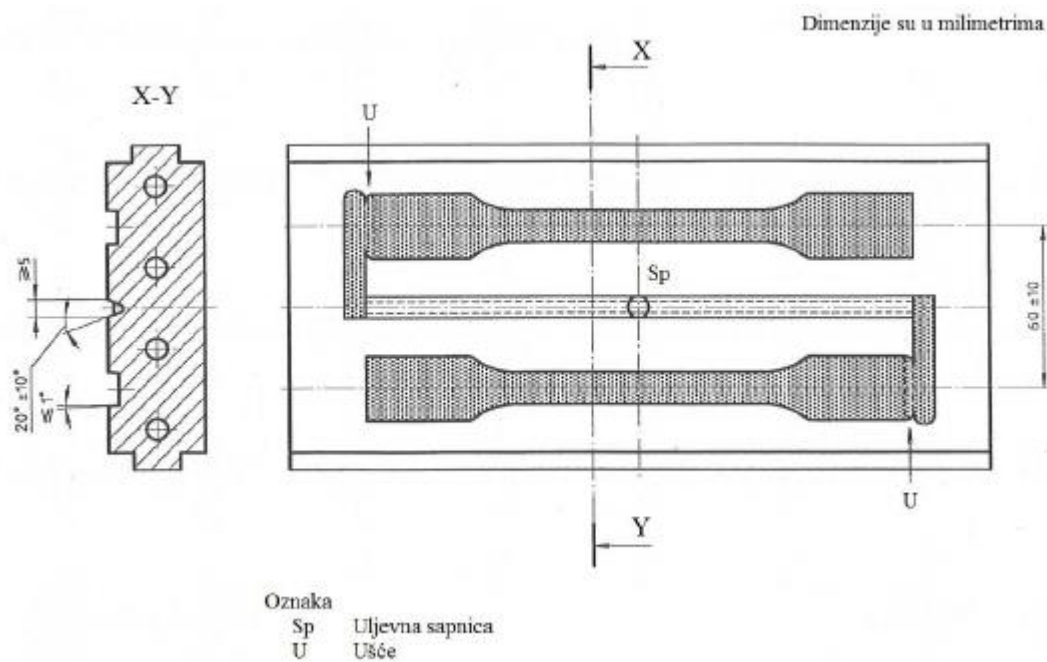
Konstruiranje s pomoću računala je stanje tehnike. No, konstruiranje s pomoću računala vezano je uz jedan ozbiljan problem: sve češće se konstruktor kalupa, osobito pri varijantnom-vrlo učestalom konstruiranju, pretvara u montažera. To može rezultirati velikim psihičkim opterećenjem, a zbog smanjene kreativnosti jer se sve ubrzanije ponavljaju ista rješenja. Kako bi se spomenuti problem rješio, predloženo je da se pri varijantnom konstruiranju s više inačica povežu funkcije konstruiranja otpreska, kalupa i pripreme programa za računalnu obradu te da ih obavlja jedna osoba. Sa stajališta konstrukcije kalupa proračuni skupljanja i vitoperenja imaju sve važniju ulogu.

Suvremena izrada kalupa temelji se na visokobrzinskim postupcima obrade odvajanjem čestica te posebnim postupcima. Sa ciljem produljenja vijeka trajanja kalupa i njegovog olakšanog punjenja, tijekom izrade, na dodirne dijelove kalupa nanose se prerađivane prevlake. Kao odgovor na maloserijske zahtjeve s kratkim rokovima širi se primjena postupaka brze proizvodnje kalupa.

4.1 ISO KALUPI (S VIŠE KALUPNIH ŠUPLJINA)

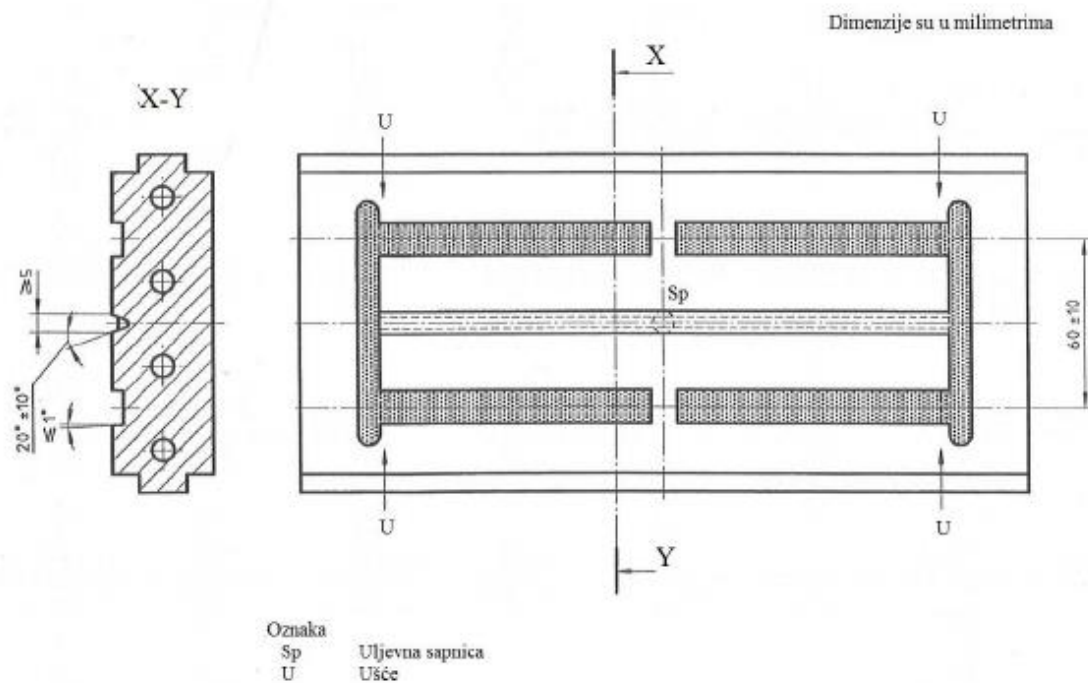
U ISO kalupima injekcijski se prešaju ispitna tijela namijenjena prikupljanju podataka po kojima se vrše usporedbe te rješavaju nedoumice vezane za međunarodne standarde.

Ispitna tijela specificirana prema normi ISO 3167 proizvode se u ISO kalupu tipa A s dvije kalupne šupljine pomoću Z ili T kanala. Više u upotrebi je Z kanal zahvaljujući većoj simetriji sile zatvaranja. (slika 4.1.). Dimenzije ispitnih tijela su tipa A, specificirane u normi ISO 3167.

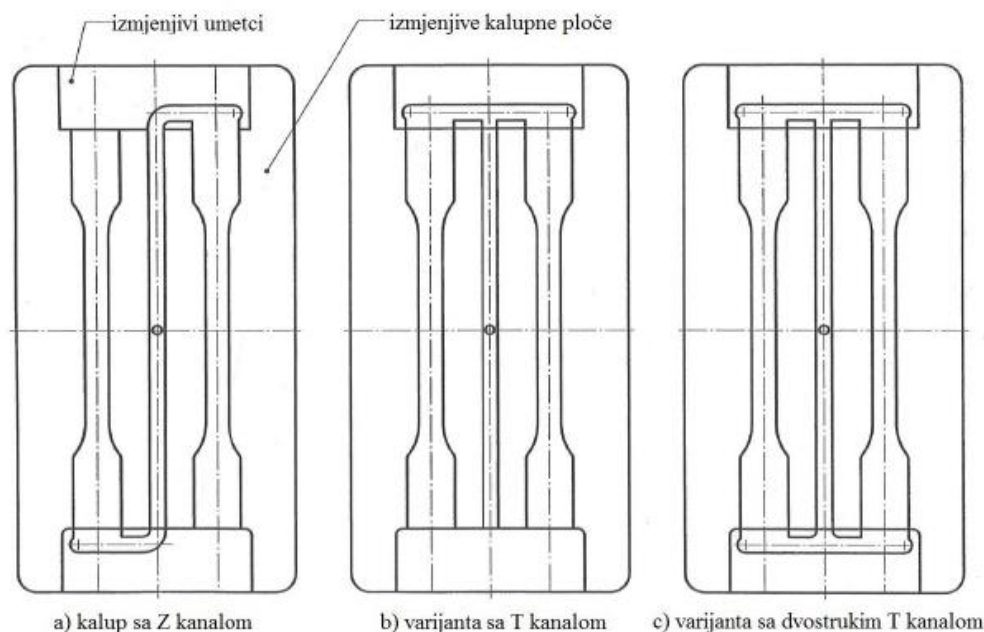


Slika 4.1: Kalupna ploča za ISO kalup tip A [6]

ISO kalup B tipa s četiri kalupne šupljine i dvostrukim T kanalom primjenjuje se za dobivanje pravokutnih ispitnih tijela dimenzija 80mm x 10mm x 4mm (slika 4.2.) Ovako dobivena ispitna tijela za višenamjenska ispitivanja imaju jednake poprečne dimenzije po sredini i duljinu od 80 mm ± 2mm.



Slika 4.2: Kalupna ploča, B tip ISO kalupa [6]



Slika 4.3: Različite konfiguracije umetaka [6]

Glavni konstrukcijski detalji ISO kalupa A i B tipa moraju zadovoljiti niže navedene specifikacije:

1. Promjer uljevne sapnice na strani mlaznice mora biti minimalno 4 mm
2. Širina i visina (ili promjer) uljevnog kanala mora biti minimalno 5 mm
3. Kalupne šupljine moraju imati ušće samo na jednom kraju kao što je prikazano na slikama 4.1. i 4.2.
4. Visina ušća mora biti najmanje 2/3 visine kalupne šupljine te širina ušća mora biti jednaka širini kalupne šupljine u dodirnoj točki ušća i kalupne šupljine
5. Ušće mora biti što je kraće moguće te ne duže od 3 mm
6. Kut nagiba uljevnog kanala mora iznositi najmanje 10° , a najviše 30° . Kalupna šupljina ne smije imati kut nagiba veći od 1° osim u područjima ramena ispitnih tijela za ispitivanje vlačne čvrstoće gdje kut nagiba ne smije biti veći od 2° .
7. Dimenzije kalupnih šupljina moraju biti takve da dimenzije dobivenih ispitnih tijela odgovaraju zahtjevanima standardom za relevantne testove. Kako bi dopustili različite postotke skupljanja kalupnih šupljina, dimenzije se odabiru između nominalnih vrijednosti i gornje granice specificiranih dimenzija za ispitno tijelo. Za ISO kalupe tipa A i B, glavne dimenzije kalupnih šupljina, u mm, moraju biti:
 - dubina: 4,0 do 4,2
 - širina središnjeg presjeka: 10,0 do 10,2
 - duljina (kalup B tip): 80 do 82
8. U slučaju upotrebe izbacivača, oni moraju biti smješteni izvan područja ispitivanja ispitnih tijela, primjerice na ramenima zvonolikih ispitnih tijela napravljenih iz kalupa tipa A ili izvan 20 mm središnjeg dijela štapićastih ispitnih tijela dobivenih iz kalupa tipa B.

9. Sustav hlađenja i grijanja kalupnih ploča trebalo bi konstruirati na način da u uvjetima rada razlika temperatura bilo koje točke na površini kalupnih šupljina i ploče bude manja od 5°C.
10. Sa ciljem spriječavanja brzih promjena u proizvodnji između različitih vrsta ispitnih tijela preporučene su izmjenjive ploče s kalupnim šupljinama i umetcima.
11. Senzor tlaka po preporuci se smješta u središnji uljevni kanal kako bi dao potpunu kontrolu vremena ubrizgavanja.
12. Izmjenjivost kalupnih ploča između različitih ISO kalupa može se osigurati slijedeći konstrukcijske detalje prikazane na slikama 4.1. i 4.2.
 - preporuka: duljina šupljine treba biti 170 mm za injekcijsko prešanje višenamjenskih ispitnih tijela u ISO kalupu A tipa. To iznosi maksimalnih 180 mm duljine za razmak između kalupnih ploča
 - minimalni razmak između priključenih točaka za kanale sustava za zagrijavanje i hlađenje može utjecati na širinu kalupnih ploča. Pritom, moguća je potreba za prostorom u ISO kalupu tipa B namijenjenom smještaju posebnih dodataka. Dodatci omogućuju izradu zarezanih ispitnih tijela za upotrebu u ISO 179.
 - linije po kojima ispitna tijela mogu biti odrezana od uljevka mogu biti definirana, npr. da su razmaka 170 mm za ISO kalup tipa A i B. Drugi par linija od 80 mm razmaka mogu biti definirane za rezanje štapića od višenamjenskih ispitnih tijela iz ISO kalupa tipa A te se mogu upotrijebiti i za rezanje kalupa manjih ploča
13. Sa ciljem olakšane provjere identičnosti svih ispitnih tijela iz kalupa, preporuča se da svaka kalupna šupljina bude označena, ali izvan područja ispitivanja ispitnih tijela. To je izvedivo graviranjem prikladnih simbola na čelo izbacivača, a time je moguće izbjeći pojavu štete na površini kalupne ploče
14. Nesavršenosti površine mogu utjecati na rezultate, pogotovo rezultate mehaničkih ispitivanja. Površine kalupnih šupljina treba ispolirati kada je to prikladno, na način da smjer poliranja odgovara smjeru opterećenja pri ispitivanju ispitnih tijela

5 ISPITNA TIJELA

5.1 PRIPREMA ISPITNIH TIJELA

Materijali zahtijevaju normizaciju i jamstvo kvalitete. Navedeno se može osigurati provedbom brojnih metoda ispitivanja i karakterizacije materijala te organizacijom informacijskih sustava o materijalima. Granična mehanička i toplinska svojstva, kemijska i biološka postojanost ispituju se normiranim mjernim metodama. Na raspolaganju su i brojne nerazorne metode ispitivanja strukture, a posljedično i svojstava materijala (spektroskopske metode).

Normirane metode ispitivanja zahtijevaju i normirana ispitna tijela. Ispitna tijela mogu se proizvesti i pripremiti ovisno o brojnim faktorima uključujući vrstu polimera i polazan oblik materijala. Kruta plastika proizvodi se injekcijskim prešanjem, a pritom može doći do pojave nehomogenosti strukture i anizotropije.

Homogenost i izotropna svojstva ispitnog tijela postižu se izravnim i posrednim prešanjem. Uz prešanje, ispitna tijela mogu se proizvesti i obradom odvajanjem čestica.

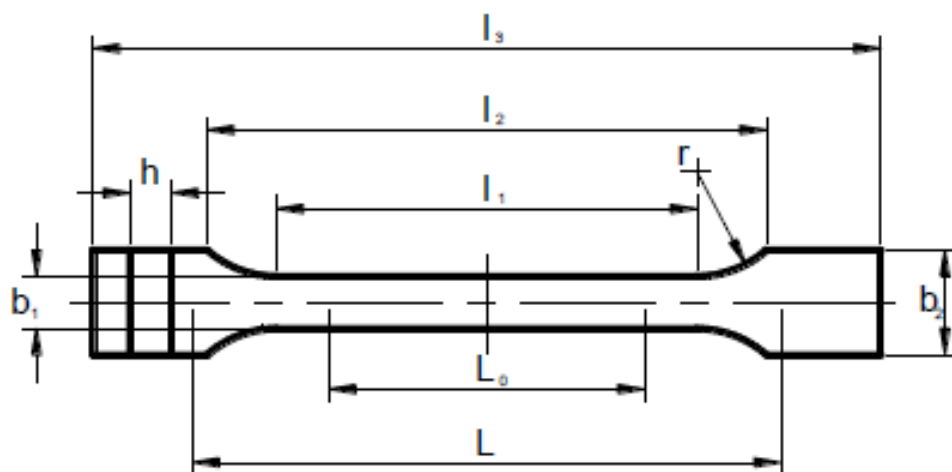
Savitljiva plastika, ploče, folije i filmovi izrađuju se postupcima istjecanja ili izrezivanja.

5.2 NORMA ISO 527 – 2: 1993

Ispitno tijelo određeno je normom ISO 527 – 2: 1993. Ima oblik bučice, a na raspolaganju su dva osnovna tipa:

- 1A - služi višenamjenskim ispitivanjima
- 1B – za strojna ispitna tijela.

Ispitno tijelo prikazano je na slici 5.1.



Slika 5.1: Oblik ispitnog tijela [6]

Prema normi, dimenzije ispitnog tijela dane su u talici 5.1.

Tablica 5.1: Dimenzije ispitnog tijela 1A i 1B [6]

Tip ispitnog tijela	Dimenzije [mm]	
	1A	1B
l_3 – ukupna duljina	$\geq 150^{(1)}$	
l_1 – duljina uskog paralelnog dijela	80 ± 2	$60 \pm 0,5$
r – polumjer	$20-25$	$\geq 60^{(4,1)}$
l_2 – udaljenost između proširenog paralelnog dijela	$104-113^{(3)}$	$106-120^{(3)}$
b_2 – širina pri kraju	$20 \pm 0,2$	
b_1 – širina uskog dijela	$10 \pm 0,2$	
h – debljina	$4 \pm 0,2$	
L_0 – mjerna duljina	$50 \pm 0,2$	
L – početna udaljenost između ispitivanja	115 ± 1	l_{20}^{+5}

⁽¹⁾ za neke materijale duljinu je potrebno povećati (npr. $l_3 = 200$ mm) kako bi se izbjeglo lomljenje ili klizanje u čeljustima kidalice

$$r = \frac{[(l_2 - l_1)^2 + (b_2 - b_1)^2]}{4 * (b_2 - b_1)} \quad (5.1.)$$

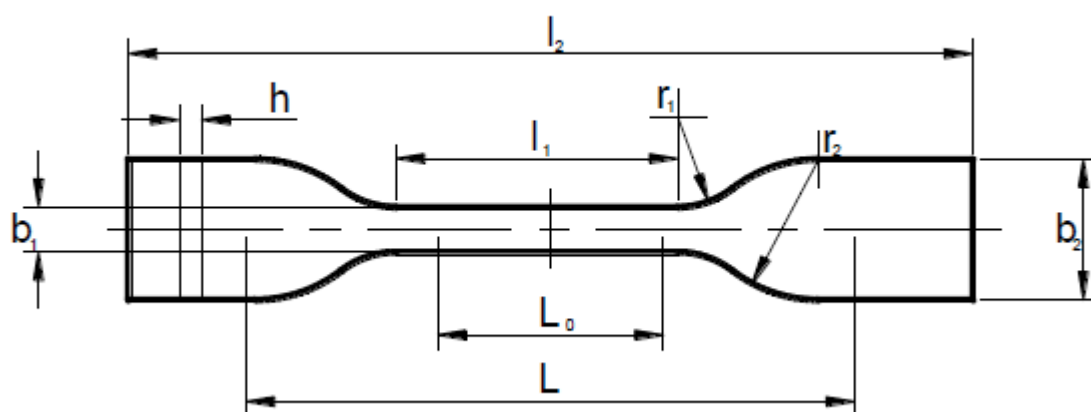
⁽³⁾ U ovisnosti o l_1 , r , b_1 i b_2 , ali u granicama tolerancije.

Za mala ispitna tijela primjenjuju se tipovi 1BA i 1BB, a pripadajuće dimenzije dane su u tablici 5.2.

Tablica 5.2: Dimenzije ispitnog tijela 1BA i 1BB [6]

Tip ispitnog tijela	Dimenzije [mm]	
	1BA	1BB
l_3 – ukupna duljina	≥ 75	≥ 30
l_1 – duljina uskog paralelnog dijela	$30 \pm 0,5$	$12 \pm 0,5$
r – polumjer	≥ 30	≥ 12
l_2 – udaljenost između proširenog paralelnog dijela	58 ± 2	23 ± 2
b_2 – širina pri kraju	$10 \pm 0,5$	$4 \pm 0,2$
b_1 – širina uskog dijela	$5 \pm 0,5$	$2 \pm 0,2$
h – debljina	≥ 2	≥ 2
L_0 – mjerna duljina	$25 \pm 0,5$	$10 \pm 0,2$
L – početna udaljenost između ispitivanja	l_{20}^{+2}	l_{20}^{+1}

U specijalnim slučajevima primjenjuju se tipovi 5A i 5B. Specijalni oblik ispitnog tijela prikazan je na slici 5.2, a njima pripadajuće dimenzije dane su u tablici 5.3.



Slika 5.2: Specijalni oblik ispitnog tijela tip 5A i 5B [6]

Tablica 5.3: Dimenzije ispitnog tijela 5A I 5B [6]

Tip ispitnog tijela	Dimenzije [mm]	
	5A	5B
l_3 – ukupna duljina	≥ 75	≥ 35
l_1 – duljina uskog paralelnog dijela	$12,5 \pm 1$	$6 \pm 0,5$
r – polumjer	25 ± 1	$12 \pm 0,5$
l_2 – udaljenost između proširenog paralelnog dijela	$4 \pm 0,1$	$2 \pm 0,1$
b_2 – širina pri kraju	$8 \pm 0,5$	$3 \pm 0,1$
b_1 – širina uskog dijela	$12,5 \pm 1$	$3 \pm 0,1$
h – debljina	50 ± 2	20 ± 2
L_0 – mjerna duljina	$20 \pm 0,5$	$10 \pm 0,2$
L – početna udaljenost između ispitivanja	≥ 2	≥ 1

6 ISPITIVANJE MEHANIČIH SVOJSTAVA MATERIJALA

Osnovna svojstva materijala u strojarstvu su mehanička: čvrstoća, granica razvlačenja, istezljivost, žilavost, tvrdoća i drugo. Mehaničko svojstvo materijala mjerljiva je veličina, koja se brojčano može odrediti normiranim metodama ispitivanja.

6.1 MEHANIČKA SVOJSTVA OTPRESAKA

Mehanička svojstva otpreska posljedica su i odraz strukture plastomera, a ovise i o parametrima prerade plastomera. Promjenom parametara injekcijskog prešanja mijenjaju se i mehanička svojstva otpresaka.

Parametri prerade najviše utjecaja imaju na orijentaciju makromolekula, punila i ojačavala, zaostala naprezanja te pojavnost strukture, odnosno njezinu kristalnost i stupanj kristalnosti.

Orijentiranost, tj. usmjerenost makromolekula materijala otpreska ima izravan utjecaj na mehanička svojstva otpreska. Anizotropija materijala pojava je kada su mehanička svojstva materijala viša u smjeru tečenja, a niža u smjeru okomitom na smjer tečenja. Usmjerenost makromolekula može se smanjiti većim putem tečenja.

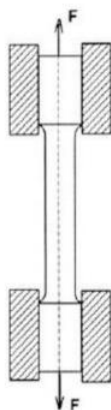
Najviše utjecaja na pojavu orijentiranosti imaju temperatura taljevine i profil brzine čela taljevine.

Amorfni i kristalasti plastomeri nemaju jednaku orijentaciju makromolekula. Pri preradi kristalastih plastomera veća su stezanja materijala te je nužno dodati veću količinu taljevine tijekom faze djelovanja naknadnog tlaka. Spomenuta dodana taljevina povisuje stupanj orijentacije, posebno kroz središte presjeka otpreska.

Visoke brzine ubrizgavanja također mogu prouzrokovati veći stupanj orijentiranosti.

6.2 RASTEZNA ČVRSTOĆA

U uvjetima jednoosnog rasteznog statičkog naprezanja, osnovna mehanička svojstva ispituju se statičkim rasteznim pokusom. Statičko rastezno ispitivanje provodi se na kidalicama ili univerzalnim ispitivalicama, kojima se ispitna tijela kontinuirano rastezno opterećuju do loma (slika 6.1). Tijekom ispitivanja, kontinuirano se mjere sila i produljenje ispitnog tijela. Statičkim rasteznim pokusom određuju se mehanička svojstva – granica razvlačenja, rastezna čvrstoća, modul elastičnosti, istezljivost, suženje itd.



Slika 6.1: Način opterećivanja ispitnog tijela tijekom statičkog rasteznog pokusa [6]

Rastezna čvrstoća računa se prema formuli:

$$R_m = \frac{F_{max}}{S_0} \quad (6.1.)$$

gdje su:

R_m – rastezna čvrstoća, MPa

F_{max} – maksimalna sila opterećenja, N

S_0 – površina početnog presjeka, mm^2

6.3 STATIČKI RASTEZNI POKUS

Osnovna mehanička svojstva polimera poput granice razvlačenja, rastezne čvrstoće, modula elastičnosti, istežljivosti i suženja utvrđuju se statičkim vlačnim pokusom.

Tijekom pokusa koji se izvodi na tzv. kidalicama, ispitni se uzorak kontinuirano vlačno opterećuje do loma. Pri ispitivanju se kontinuirano mjere sila i produljenje ispitnog uzorka te se pisačem grafički registrira dijagram sila-produljenje.

Uređaji za ispitivanje, tj. kidalice, različitih su veličina s obzirom na silu kojom mogu djelovati, a njihovi glavni dijelovi su:

1. Kućište
2. Mehanizam za prijenos sile na uzorak (mehanički ili hidraulički)
3. Pristroj za držanje uzorka (“čeljusti”)
4. Uređaj za registriranje sile i produljenja.

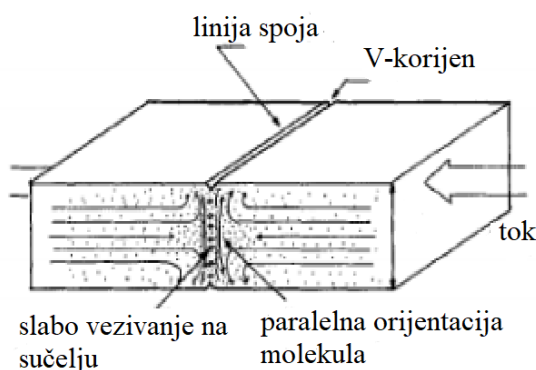
7 EKSPERIMENTALNI DIO

7.1 CILJ POKUSA

Pokusom je bilo potrebno utvrditi utjecaj signifikantnih parametara injekcijskog prešanja na rasteznu čvrstoću linije spoja ispitnih tijela. Bilo je potrebno usporediti ponašanje amorfnih i kristalastih plastomera u vezi s promatranim parametrima injekcijskog prešanja. Potrebni podaci dobiveni su provedbom pokusa injekcijskog prešanja normiranih ispitnih tijela pomoću kalupa za injekcijsko prešanje napravljenog prema ISO normama.

Rastezna čvrstoća linije spoja određena je trima faktorima:

- nepotpuno vezivanje na sučelju dva fronta taljevina
- smrznuta molekularna orijentacija uzrokovana pojavom “*fountain flow*”
- postojanje V korijena oko linije spoja [11]



Slika 7.1: Uzroci slabih svojstava linije spoja [11]

7.2 ISPITNI MATERIJAL

Pokus je obavljen za jedan amorfni te za jedan kristalasti plastomer te je napravljena njihova usporedba na osnovu dobivenih podataka.

Plastomeri su građeni iz linearnih ili granatih makromolekula, međusobno povezanih slabim Van der Waalsovima vezama, stoga porastom temperature omekšavaju (formiran komad može se zagrijati i preoblikovati) te potom opadanjem temperature ponovo skrućuju. Lako su preradivi protiskivanjem (vlakna, folije), lijevanjem u kalupe (posude i veći proizvodi) itd.

Plastomeri su topivi u različitim otapalima, a njihove otopine su vrlo viskozne, primjerice ljepilo za papir koje nakon što otapalo ishlapi lijepi papir.

Zahvajujući slabim međumolekulskim vezama imaju svojstvo recikliranja.

7.3 KRISTALASTI PLASTOMER – POLIPROPILEN

Da bi polimer imao kristalnu strukturu mora biti ispunjen osnovni uvjet postojanja konfiguracioni regularnih makromolekula i konformacija velike geometrijske pravilnosti, tj. struktura ponavljanih jedinica koja omogućava pravilnu raspodjelu pojedinih segmenata makromolekula. Uz to na mogućnost stvaranja kristalnih područja utječu i međumolekulske

veze. Jače sekundarne veze u linearnim makromolekulama znače i veću sklonost prema stvaranju uređenih kristalnih područja, osobito kod hlađenja iz taljevine.

Za kristalasti plastomer u ovom pokusu odabran je polipropilen (PP). Polipropilen je kristalasti plastomer koji se sastoji od linearnih makromolekula i jedinica $-\text{CH}(\text{CH}_3)-\text{CH}_2-$ koje se ponavljaju.

Primjena polipropilena je vrlo široka s godišnjom potrošnjom na globalnoj razini većom od 46 milijuna tona. Time je polipropilen drugi po proizvodnji i potrošnji u svijetu, odmah iza polietilena.

Široku primjenu, od medicine, ambalaže, automobilske i avioindustrije, poljoprivrede, građevinarstva, do izrade namještaja, spremnika za ulje i vodu, različitih vrsta cijevi može zahvaliti dobrim svojstvima i prihvatljivoj tržišnoj cijeni.

Odlikuje se vrlo niskom gustoćom, dakle malom masom, visokom rasteznom i pritiskom čvrstoćom, odličnim dielektričnim svojstvima. Postojan je na većinu kiselina, lužina i organskih otapala. Nije otrovan, nije osjetljiv na vlagu te je lako preradiv.

Konkretno, upotrijebljen je Polipropilen Tipplen 949 A, a njegova svojstva navedena od strane proizvođača prikazana su u tablici 7.1.

Tablica 7.1. Svojstva navedena od strane proizvođača za polipropilen

Svojstvo	Test metoda	Jedinica	Tipična vrijednost
MFR (230°C / 2.16 kg)	ISO 1133-1	g/10 min	45
Modul smicanja *	ISO 178	MPa	1900
Modul elastičnosti *	ISO 527-1,2	MPa	1800
Rastezna čvrstoća *	ISO 527-1,2	MPa	39.5
Rastezno naprezanje*	ISO 527-1,2	%	9
Čvrstoća sudara (zareznog, 23°C)	ISO 180/A	kJ/m^2	2
HDT (0.45 Mpa) *	ISO 75-1,2	°C	118
Tvrdoća po Rockwellu *	ISO 2039/2	R skala	104

Tipične vrijednosti, ne mogu se uzeti kao specifikacije.

* Srednje vrijednosti mehaničkih svojstava nekoliko vrijednosti dobivenih na standardnom testom injekcijski prešanih uzoraka prema ISO 1872-2.

Tipplen H 949 A može se prerađivati konvencionalnim ubrizgavalicama, a preporučene temperature obrade su od 190 °C do 235 °C.

Ovaj materijal je vrlo lako preradiv u kratkim vremenima ciklusa. Preporuča se za injekcijsko prešanje tankostijenih proizvoda za pakiranje, kućanstvo i kuhinjske proizvodnje. Pogodan je za kontakt s hranom te podliježe regulativi za kontakt s hranom i sigurnost igračaka.



Slika 7.2: Polipropilen

7.4 AMORFNI PLASTOMER – POLISTIREN

Kod polimera potpune amorfne strukture ne postoji pravilan poredak molekula te se može reći da je sustav uvijek u “stanju nereda”. Amorfni polimeri su u staklastom ili gumastom stanju kada su im makromolekulni lanci poprečno povezani. Makromolekule nepravilnog poretka opisuju se modelom statističkog klupka. Nadmolekulna struktura amornih polimera još uvijek nije u potpunosti razjašnjena.

U pokusu je pri injekcijskom prešanju amornog plastomera, upotrijebljen polistiren. Polistiren je građen od linearnih makromolekula koje se sastoje od niza ponavljanih jedinica $-CH_2-CH(C_6H_5)$. Njegova uobičajeno amorfna struktura rezultat je statističke orijentacije makromolekula ataktne konfiguracije.

Polistiren je čvrst i tvrd, staklu sličan proziran plastomer. Odlikuje se visokim indeksom loma i velikom propusnošću vidljivog dijela svjetla. Odličan je električni izolator. Često mu se radi prevelike krtosti za pojedine pripreme modificiraju svojstva. Rješenje problema krtosti uključuje uporabu polimera veće molekulske mase, plastifikatora, dodataka punila, namjernu orijentaciju polimernih molekula, kopolimerizaciju te aditive od kaučuka.

Za potrebe provedenog pokusa, upotrijebljen je Polistiren SYNTHOS PS GP 154. Bezbojan je, odličnih optičkih svojstava, velikog sjaja i uravnotežene kombinacije reoloških, mehaničkih i toplinskih svojstava. Tehnički parametri i uvjeti prerade navedeni od strane proizvođača dani su u tablici 7.2:

Tablica 7.2: Tehnički list polistirena Synthos PS GP 154

Parametri	Jedinica	Tipična vrijednost	Standard	Napomena
MFR	g/10 min	9-10	ISO 1133/H	200 °C; 5kg
Otpornost na udarni rad loma	kJ/m ²	10	ISO 179/1eU	23°C
Temperatura omekšavanja	°C	86	ISO 306/B50	50°C/h; 50N
Sadržaj zaostalog stirena	%	0,025	Internal	-
Zapaljivost ¹	Class	HB	UL 94	1,6 mm
Stežanje materijala	%	0,2-0,5	Internal	-
Parametri prerade				
Temperatura/Vrijeme sušenja ²	°C/h	70/2-4	-	Sušeno vrućim zrakom
	°C/h	70/1	-	Sušara s molekulskim sitom
Temperatura taljevine pri injekcijskom prešanju	°C	180-260	-	-
Temperatura kalupa pri injekcijskom prešanju	°C	10-60	-	-
Temperatura taljevine pri ekstrudiranju	°C	200-240	-	-

¹ Testirano u Elektro-tehničkom institutu za ispitivanja, Prag, Republika Češka

² Za proizvode visoke kvalitete površine



Slika 7.3: Polistiren

7.5 OPREMA

Pokus je izveden u pogonskim uvjetima. Polipropilen nije bilo potrebno sušiti. Polistiren je sušen prema preporuci proizvođača, 2h na 70°C. Injekcijsko prešanje polipropilena i polistirena provedeno je na ubrizgavalici Battenfeld UNILOG 1000 (slika 7.4.) čije su tehničke karakteristike dane u tablici 7.3.

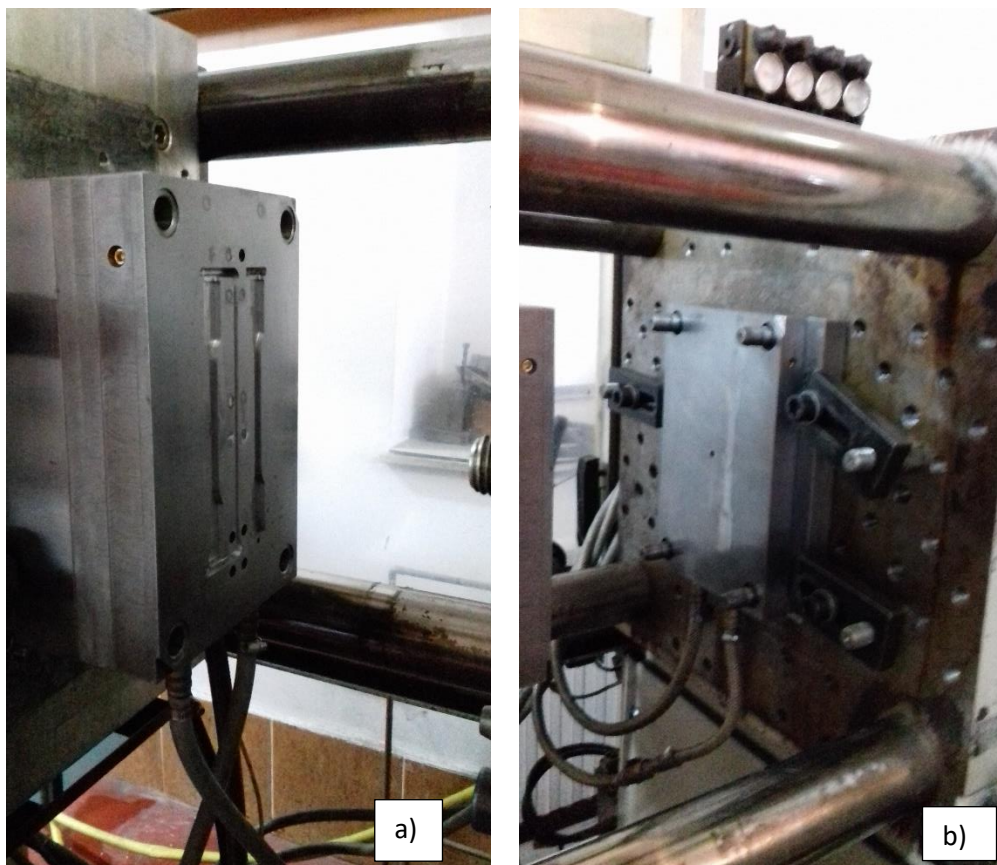


Slika 7.4: Ubrizgavalica Battenfeld UNILOG 1000

Tablica 7.3: Karakteristike ubrizgavalice Battenfeld UNILOG 1000

Karakteristika	Vrijednost	Jedinica
Sila zatvaranja kalupa	500	kN
Udaljenost između vodilica	320x320	mm
Hod otvaranja kalupa	250	mm
Min/max ugradbena visina kalupa	150/250	mm
Promjer pužnog vijka	35	mm
Obujam ubrizgavanja	131	cm ³
Tlak ubrizgavanja	1484	Bar
Ls/D omjer	18	-
Pumpa motor	11	kW
Sila izbacivača	17.5	kN

Kazetni umetci koji se postavljaju u pomični dio kalupa, postavljeni su tako da su prisutna dva uljevna ušća, odnosno odabrana je varijanta s C kanalom. Tako postavljenim kalupom dobivena su ispitna tijela s linijom spoja. Pomični dio kalupa sa spomenutom konfiguracijom kazetnih umetaka te nepomični dio kalupa vide se na slici 7.5 a) i b).



Slika 7.5: a) Pomični dio kalupa s C konfiguracijom b) Nepomični dio kalupa

Po injekcijskom prešanju, sa svrhom utvrđivanja rastezne čvrstoće bilo je potrebno odrediti površinu linije spoja, preko dimenzija otpresaka. Dimenzije otpresaka, odnosno širina i debljina ispitnih tijela mjerene su digitalnom pomičnom mjerkom Powerfix (slika 7.6). Masa ispitnih tijela mjerena je na digitalnoj vagi.



Slika 7.6: Powerfix digitalna pomična mjerka

Rastezna čvrstoća ispitnih tijela mjerila se na kidalici proizvođača SHIMADZU (slika 7.7) Mjerno područje kidalice je $L_0 = 75 \text{ mm}$. Razmak između čeljusti je 115 mm .



Slika 7.7: SHIMADZU kidalica

Pomoću programa Design Expert dobiveni rezultati pokusa su obrađeni i analizirani.

7.6 CENTRALNO – KOMPOZITNI PLAN POKUSA

Model koji vjerodostojno opisuje proces moguće je razviti kada faktori pokusa doista i utječu na proces, a podaci dobiveni pokusom imaju prihvatljivu točnost i preciznost.

Postojeći faktorski plan na dvije razine se dodavanjem centralnog stanja pokusa i stanja pokusa jednako udaljenih od centralne točke (aksijalnih točaka) razvija u centralno-kompozitni plan pokusa.

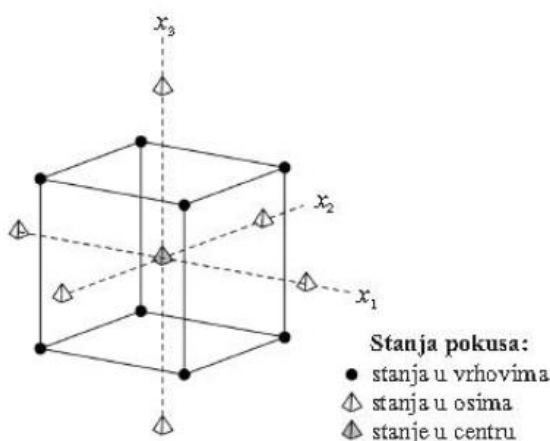
Centralno – kompozitni plan pokusa spada u skupinu pokusa višeg reda, a izvodi se tzv. *metodama odzivne površine*. Metoda odzivne površine skup je statističkih i matematičkih metoda koje se primjenjuju za razvoj, poboljšanje i optimiranje procesa. Kao veličina kvalitete proizvoda mjeri se odziv. Odzivna površina uz dovoljnu preciznost, točnost i pouzdanost omogućuje predviđanje budućih rezultata u okviru analiziranog područja te daje uvid u čitav proces.

Praksa je pokazala da su uglavnom dovoljne funkcije odziva prvog i drugog reda. Aproksimiranje polinomima pogodno je jer omogućuje lako izračunavanje koeficijenta polinoma, no potrebno je imati u vidu da se samo aproksimiraju stvarne zakonitosti i to u istraživanom području.

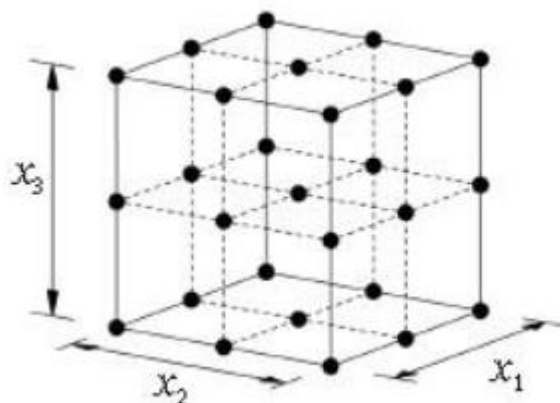
Centralno- kompozitni plan pokusa model je pokusa 1. Reda (2^k) proširen dodatnim točkama (stanjima pokusa) u centru i točkama u osima sa ciljem procjenjivanja parametara modela 2. reda.

Centralno-kompozitni plan pokusa u vrhovima ima 2^k stanja, u osima $2k$ faktorska stanja i stanja u centru pokusa (k -broj promatranih faktora). Takav plan je alternative $3k$ modelu u izgradnji modela pokusa 2.reda. Time je smanjen broj izvođenja (faktorskih stanja) u usporedbi s potpunim faktorskim modelom pokusa.

Slika 7.8. prikazuje model centralno-kompozitnog plana pokusa pri $k=3$, za koji je potrebno 15 stanja pokusa. Usporedbe radi, kod potpunog plana pokusa bilo bi potrebno 27 stanja pokusa.

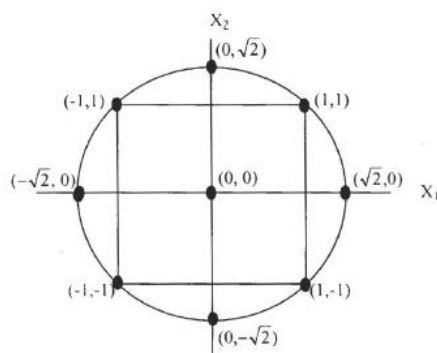


Slika 7.8: centralno – kompozitni plan pokusa s 3 faktora [13]



Slika 7.9: Potpuni faktorski plan pokusa 3^k [13]

Slika 7.10. prikazuje model centralno-kompozitnog plana pokusa s 2 faktora (x_1 , x_2) za koji je potrebno 13 stanja pokusa.



Slika 7.10: Centralno-kompozitni plan pokusa s 2 faktora [13]

Pri svakom pokusu teži se međusobnoj nezavisnosti procjena glavnih faktora i njihovih interakcija, a koja se postiže kada je pokus ortogonalan i rotabilan.

Ortogonalnost pokusa vrijedi ako je zbroj produkata kodiranih stanja bilo koje dvije kolone u matrici pokusa jednak nuli. Ako se centralno-kompozitnom pokusu dodaju stanja pokusa na način da su sva stanja jednako udaljena od centra pokusa, pokus postaje rotabilan. Rotabilnost ovisi o tzv. osnovj udaljenosti α (udaljenost stanja pokusa u osima od centra pokusa).

Rotabilnost vrijedi ako je:

$$\alpha = \sqrt[4]{F_s} \quad (7.3.)$$

gdje je:

F_s - broj faktorskih stanja ($F_s = 2^k$ u slučaju potpunog faktorskog plana pokusa).

Tablica 7.4 prikazuje vrijednosti α za rotabilan centralno-kompozitni plan pokusa.

Tablica 7.4.: Vrijednosti α za rotatabilan centralno-kompozitni plan pokusa. [6]

Broj faktora k	Broj faktorskih stanja F_s	Broj ukupnih stanja pokusa N	Osna udaljenost A
2	4	$8 + n_c^*$	1,414
3	8	$14 + n_c$	1,682
4	16	$24 + n_c$	2,000
5	32	$32 + n_c$	2,378

* n_c - broj stanja u centru pokusa

Pomoću dodatnih stanja u centru pokusa moguće je usporediti vrijednosti mjerenja zavisne varijable u centru pokusa s aritmetičkom sredinom za ostatak pokusa. Značajno odstupanje aritmetičke sredine centra pokusa od ukupne aritmetičke sredine ostalih stanja ukazuje na nelinearnu vezu između faktora pokusa i zavisne varijable.

Grešku pokusa moguće je ustanoviti iz varijabilnosti ponovljenih stanja u slučaju da se pokus djelomično ponavlja. Procjena greške pokusa ne ovisi o lineranoj ili nelineranoj prirodi modela niti o tome sadrži li model interakcije višeg reda ako se stanja izvode pod identičnim uvjetima, odnosno identičnim razinama faktora. Na taj način dobiva se čista greška pokusa, kao posljedica nepouzdanosti zavisne varijable.

Polinom II stupnja kojim se proces može opisati u općem slučaju glasi:

$$\hat{Y} = b_0 + b_1x_1 + \dots + b_kx_k + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + \dots + b_{k-1}x_{k-1}x_k + b_{11}x_1^2 + \dots + b_{kk}x_k^2 \quad (7.4.)$$

Pritom su koeficijenti b_0, \dots, b_k određeni metodom minimalne sume kvadrata odstupanja računskih od stvarnih vrijednosti.

7.7 POKUS 1 – KRISTALNI PLASTOMER - ODREĐIVANJE UTJECAJA SIGNIFIKANTNIH PARAMETARA INJEKCIJSKOG PREŠANJA NA RASTEZNU ČVRSTOĆU LINIJE SPOJA ISPITNIH TIJELA OD POLIPROPILENA

Pokusom je bilo potrebno odrediti utjecaj signifikantnih parametara injekcijskog prešanja na rasteznu čvrstoću linije spoja.

Ispitani su utjecaji temperature taljevine i vremena naknadnog tlaka na rasteznu čvrstoću linije spoja ispitnih tijela izrađenih od polipropilena

Tijekom cijelog izvođenja pokusa, parametri navedeni u tablici 7.5 uzimaju se kao konstantni.

Tablica 7.5: Konstantni parametri injekcijskog prešanja tijekom provedbe pokusa 1

Parametar	Jedinica	Vrijednost
Tlak ubrizgavanja	bar	100
Temperatura medija za temperiranje	°C	15
Brzina ubrizgavanja	%	minimalna
Vrijeme hlađenja otpreska	s	12
Vrijeme ubrizgavanja	s	1,4

Razine faktora za centralno kompozitni plan pokusa s tri faktora prikazane su u tablici 7.6.

Tablica 7.6: Razine faktora za CCD plan pokusa (PP)

Razine	x1 Temperatura taljevine, °C	x2 Vrijeme naknadnog tlaka, s
-1,41	190	1
-1	197	2
0	212	4,5
1	228	7
1,41	235	8

Pokus je izveden po centralno – kompozitnom planu pokusa na pet razina s dva faktora. Promjenjivi utjecajni parametri su temperatura taljevine i vrijeme naknadnog tlaka. Statistički nasumičnim redoslijedom prema tablici slučajnih brojeva provedeno je 13 stanja pokusa. Za svako od 13 stanja pokusa vršilo se 5 ponavljanja injekcijskog prešanja ispitnog tijela.

Tijekom prvih ciklusa injekcijskog prešanja u ovom pokusu, uočeni su problemi s formiranjem linije spoja na otpresku. Zaključeno je da je prevelika brzina ubrizgavanja, a s obzirom da kalup nema kanale za otplinjavanje te je izabran postupak injekcijskog prešanja s dva uljevna ušća (C konfiguracija kazetnih umetaka) zrak bi se zarobio na samom dodiru tokova taljevina te gorio. Problem je riješen smanjenjem brzine ubrizgavanja na minimalnu. Opaženo je da ciklus prešanja jednog ispitnog tijela traje cca 32 sekunde.



Slika 7.11: Problemi s linijom spoja dva toka taljevine sa suprotnih krajeva pri većoj brzini ubrizgavanja



Slika 7.12: Prva ispitna tijela dobivena smanjenjem brzinom ubrizgavanja na minimalnu



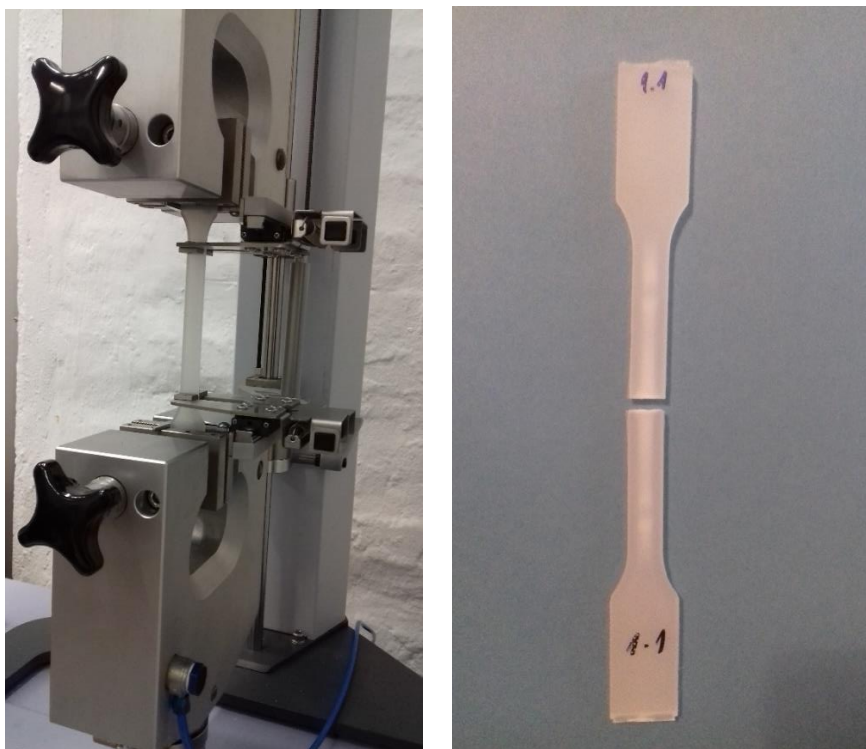
Slika 7.13: Injekcijski isprešana ispitna tijela od polipropilena

Po završetku injekcijskog prešanja, obavilo se mjerenje dimenzija otpresaka pomoću pomične mjerke. Izmjerene su širina i debljina linije spoja ispitnog tijela te je izračunata površina linije spoja.

Tablica 7.7 Izmjerene dimenzije i izračunata površina linije spoja po stanjima (PP)

Stanje	Temperatura taljevine, °C	Vrijeme naknadnog tlaka, s	Debljina, mm	Širina, mm	Površina, mm ²
7	212	1,0	3,99	9,94	39,63
6	235	4,5	4,00	9,95	39,82
11	212	4,5	4,01	9,95	39,88
9	212	4,5	4,01	9,96	39,92
5	190	4,5	4,01	9,98	40,02
4	228	7,0	4,00	9,98	39,94
2	228	2,0	3,99	9,94	39,63
3	197	7,0	4,02	10,01	40,25
10	212	4,5	4,00	9,93	39,75
8	212	8,0	4,04	10,03	40,47
13	212	4,5	3,98	9,92	39,50
1	197	2,0	3,99	9,93	39,57
12	212	4,5	3,99	9,92	39,55

Potom je bilo potrebno ispitna tijela ispitati na kidalici te odrediti njihovu rasteznu čvrstoću. Brzina kidanja bila je 5 mm/min.



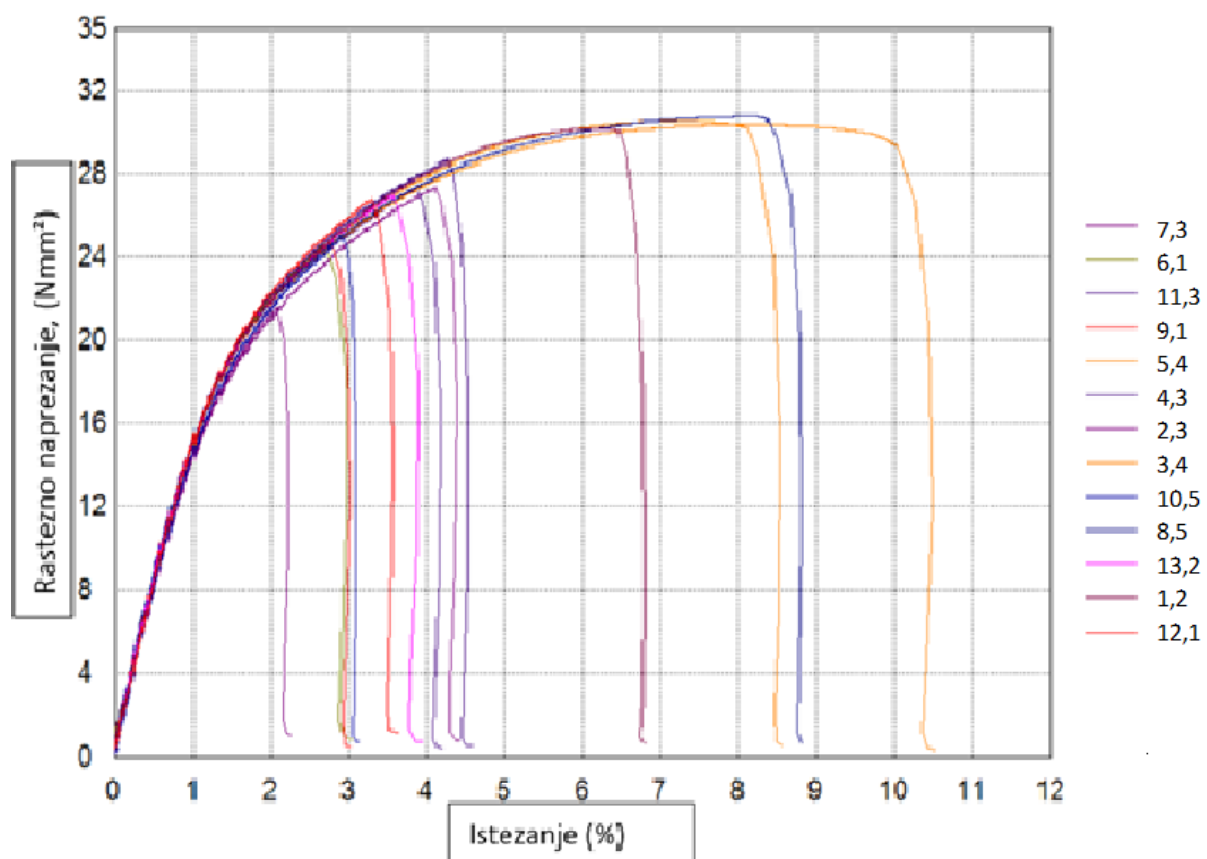
Slika 7.14: a) Kidanje ispitnog tijela b) Lom ispitnog tijela na liniji spoja
Vrijednosti rastezne čvrstoće dobivene su dijeljenjem sile potrebne za kidanje ispitnog uzorka s površinom linije spoja.

Prikaz stanja pokusa 2 te ispitivanjem dobivenih rasteznih čvrstoća za svako stanje dan je u tablici, a dijagram rasteznog naprezanja-istezanja za PP prikazan je na slici 7.16.

Tablica 7.8: Rastezna čvrstoća ispitana na kidalici za sva stanja pokusa (PP)

Stanje	Temperatura taljevine, °C	Vrijeme naknadnog tlaka, s	Rastezna čvrstoća, N/mm^2
7	212	1,0	27,46
6	235	4,5	24,87
11	212	4,5	27,17
9	212	4,5	25,57
5	190	4,5	30,75
4	228	7,0	28,68
2	228	2,0	21,83
3	197	7,0	30,58
10	212	4,5	25,72
8	212	8,0	30,55
13	212	4,5	27,48
1	197	2,0	30,17
12	212	4,5	26,61

Aritmetička sredina	27,55
Standardno odstupanje	2,94



Slika 7.15: Dijagram rasteznog naprezanja – istezanja za PP – na dijagramu su prikazane linije samo od jednog ispitnog tijela po stanjima pokusa
 U ovom ispitivanju prekidna čvrstoća R_p jednaka je rasteznoj čvrstoći R_m .

7.8 POKUS 2 – AMORFNI PLASTOMER – ODREĐIVANJE UTJECAJA SIGNIFIKANTNIH PARAMETARA INJEKCIJSKOG PREŠANJA NA RASTEZNU ČVRSTOĆU LINIJE SPOJA ZA POLISTIREN

Pokusom je bilo potrebno odrediti utjecaj signifikantnih parametara injekcijskog prešanja na rasteznu čvrstoću linije spoja.

Ispitani su utjecaji temperature taljevine i vremena naknadnog tlaka na rasteznu čvrstoću linije spoja ispitnih tijela izrađenih od polistirena.

Tijekom cijelog izvođenja pokusa, parametri navedeni u tablici 7.9. uzimaju se kao konstantni.

Tablica 7.9: Konstantni parametri injekcijskog prešanja tijekom provedbe pokusa²

Parametar	Jedinica	Vrijednost
Tlak ubrizgavanja	bar	100
Temperatura medija za temperiranje	°C	15
Brzina ubrizgavanja	%	minimalna
Vrijeme hlađenja otpreska	s	12
Vrijeme ubrizgavanja	s	1,4

Razine faktora za centralno kompozitni plan pokusa prikazane su u tablici 7.10.

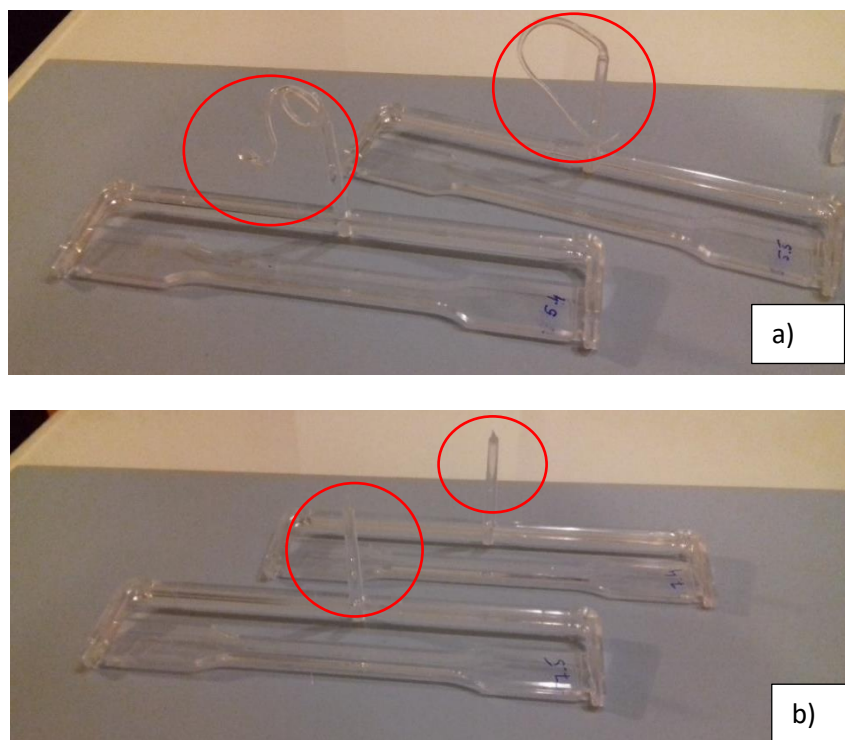
Tablica 7.10 Razine faktora za CCD plan pokusa (PS)

Razine	x1 Temperatura taljevine, °C	x2 Vrijeme naknadnog tlaka, s
-1,41	200	1
-1	205	2
0	220	4,5
1	235	7
1,41	241	8

Pokus je izveden po centralno – kompozitnom planu pokusa na pet razina s dva faktora. Promjenjivi utjecajni parametri su temperatura taljevine i vrijeme naknadnog tlaka. Statistički nasumičnim redoslijedom prema tablici slučajnih brojeva provedeno je 13 stanja pokusa. Za svako od 13 stanja pokusa vršilo se 5 ponavljanja injekcijskog prešanja ispitnog tijela.

Tijekom pokusa, uočeno je da je za stanje 5 stroju otežano doziranje plastomerne taljevine jer je pri nižoj granici preporučene temperature obrade tečenje taljevine otežano. Vidi se razlika u ostacima materijala pri vrhu uljevnog sustava (slika 7.17.).

U usporedbi s injekcijskim prešanjem polipropilena, ispitna tijela od polistirena pokazuju manja stezanja materijala pri hlađenju otpresaka. Polistirenska ispitna tijela dimenzionalno djeluju stabilnija od ispitnih tijela od polipropilena.



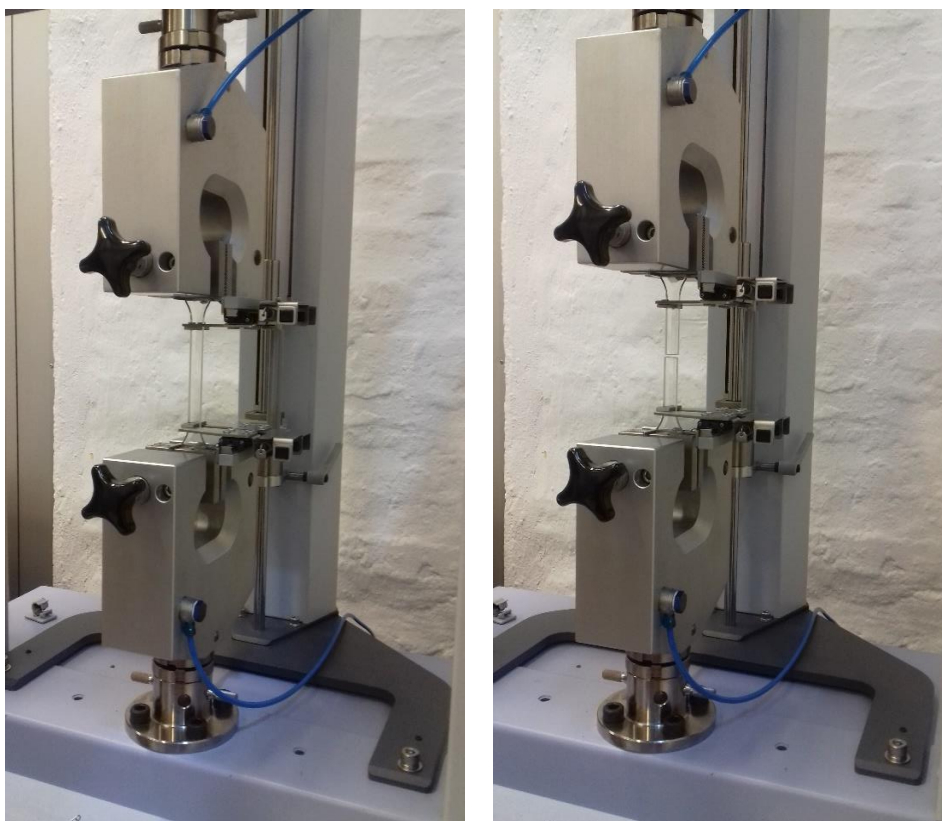
Slika 7.16: a) Ostatak materijala kod uljevnog sustava pri nižim temperaturama u odnosu na više temp (b)

Po završetku injekcijskog prešanja, obavilo se mjerenje dimenzija otpresaka pomoću pomične mjerke. Izmjerene su širine i debljine linije spoja ispitnih tijela te je izračunata površina linije spoja.

Tablica 7.11 Izmjerene dimenzije i izračunata površina linije spoja po stanjima (PS)

Stanje	Temperatura taljevine, °C	Vrijeme naknadnog tlaka, s	Debljina, mm	Širina, mm	Površina, mm ²
7	220	1,0	3,99	10,12	40,36
6	241	4,5	4,02	10,14	40,79
11	220	4,5	4,03	10,14	40,81
9	220	4,5	4,01	10,13	40,61
5	200	4,5	4,02	10,13	40,78
4	235	7,0	4,05	10,17	41,19
2	235	2,0	4,01	10,15	40,64
3	205	7,0	4,05	10,15	41,10
10	220	4,5	4,04	10,15	40,98
8	220	8,0	4,05	10,15	41,13
13	220	4,5	4,05	10,14	41,08
1	205	2,0	4,01	10,15	40,71
12	220	4,5	4,04	10,14	40,90

Potom je bilo potrebno ispitna tijela ispitati na kidalici te odrediti njihovu rasteznu čvrstoću. Brzina kidanja bila je 5 mm/min. Vrijednosti rastezne čvrstoće dobivene su dijeljenjem sile potrebne za kidanje ispitnog uzorka s površinom linije spoja.



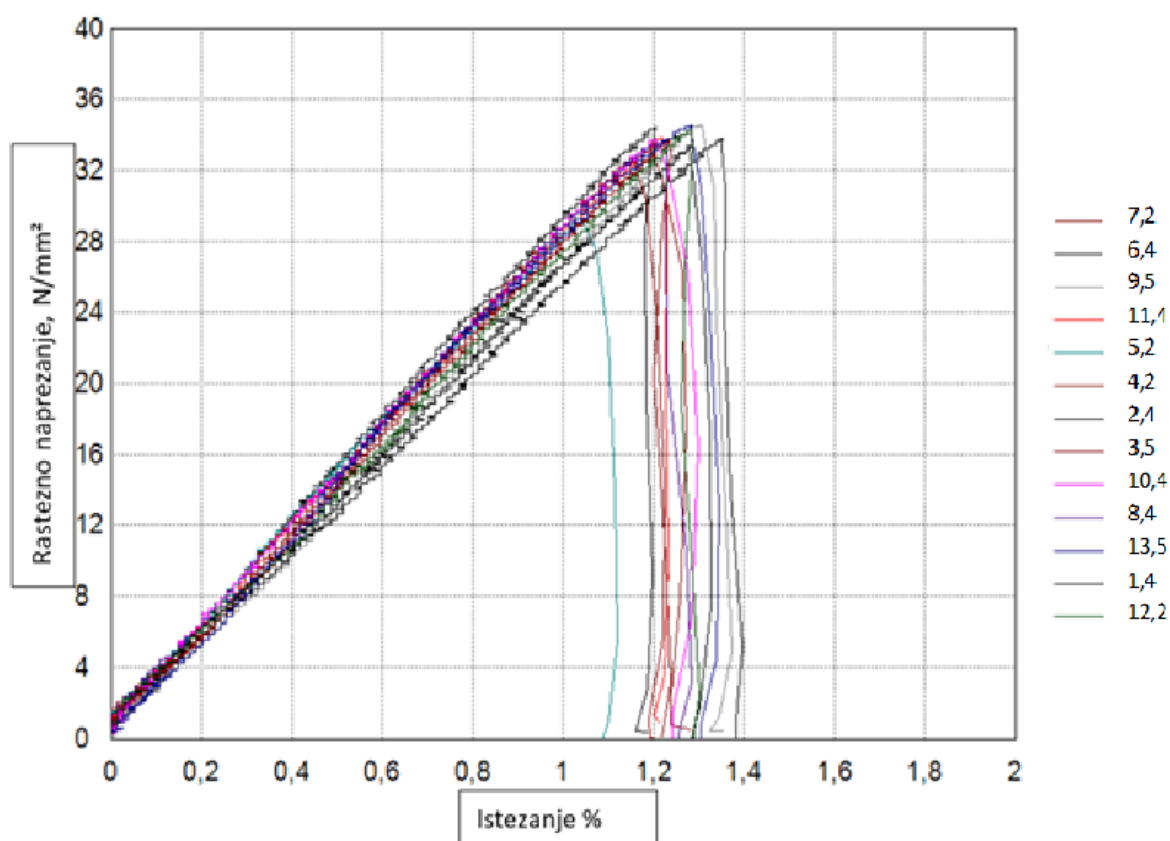
Slika 7.17: a) Kidanje ispitnog tijela na kidalici b) Lom ispitnog tijela po liniji spoja

Prikaz stanja pokusa 2 te ispitivanjem dobivenih rasteznih čvrstoća za svako stanje dan je u tablici, a dijagram rasteznog napreznja-istezanja za PS prikazan je na slici 7.19.

Tablica 7.12 Rastezna čvrstoća ispitana na kidalici za sva stanja pokusa (PS)

Stanje	Temperatura taljevine, °C	Vrijeme naknadnog tlaka, s	Rastezna čvrstoća, N/mm^2
7	220	1,0	32,88
6	241	4,5	34,28
11	220	4,5	33,60
9	220	4,5	33,63
5	200	4,5	28,46
4	235	7,0	33,87
2	235	2,0	33,28
3	205	7,0	32,41
10	220	4,5	33,99
8	220	8,0	33,72
13	220	4,5	34,04
1	205	2,0	33,82
12	220	4,5	34,38

Aritmetička sredina	33,26
Standardno odstupanje	1,74



Slika 7.18: Dijagram rasteznog naprezanja – istezanja za PS – na dijagramu su prikazane linije samo od jednog ispitnog tijela po stanjima pokusa

U ovom ispitivanju prekidna čvrstoća R_p jednaka je rasteznoj čvrstoći R_m .

7.9 ANALIZA POKUSA 1 - KRISTALNI PLASTOMER - ODREĐIVANJE UTJECAJA SIGNIFIKANTNIH PARAMETARA INJEKCIJSKOG PREŠANJA NA RASTEZNU ČVRSTOĆU LINIJE SPOJA ISPITNIH TIJELA OD POLIPROPILENA

U tablici 7.13 prikazani su rezultati analize utjecaja parametara na rasteznu čvrstoću u programskom paketu Design Expert modulom ANOVA (analiza varijance).

Tablica 7.13. Rezultati analize varijance – utjecaj parametara na rasteznu čvrstoću u pokusu1.

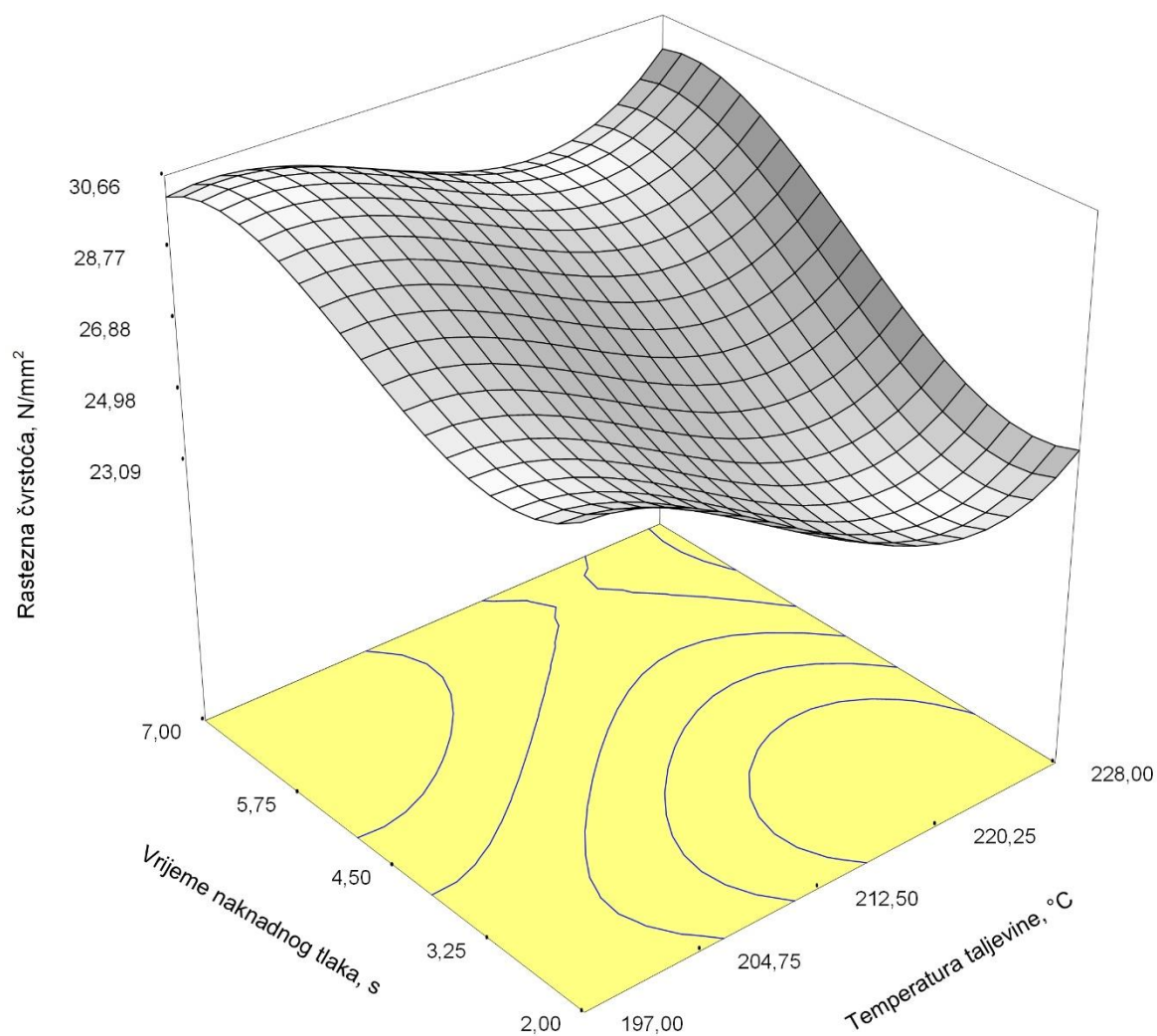
	Suma kvadrata odstupanja	Stupnjevi slobode	Srednji kvadrat odstupanja	Varijabla F	Rizik odbacivanja hipoteze H_0	
Model	41,762	7	5,966	0,694	0,681	Nije signifikantno
x_1	8,715	1	8,715	1,014	0,360	
x_2	14,471	1	14,471	1,683	0,251	
x_1^2	13,960	1	13,960	1,624	0,258	
x_2^2	0,389	1	0,389	0,045	0,839	
$x_1 \cdot x_2$	2,941	1	2,941	0,3422	0,584	
x_1^3	10,153	1	10,153	1,181	0,326	
x_2^3	12,110	1	12,110	1,409	0,288	
$x_1^2 \cdot x_2$	0	0				
$x_1 \cdot x_2^2$	0	0				
Ostatak	42,972	5	8,594			Nije signifikantno
Odstupanje od modela	1,522	1	1,522	0,146	0,721	
Pogreška	41,449	4	10,36247			
Ukupno	84,734	12				

U tablici 7.14 prikazani su osnovni statistički podaci o modelu.

Tablica 7.14. Pregled statističkih podataka o modelu - utjecaj parametara na rasteznu čvrstoću

Standardno odstupanje	2,93
Aritmetička sredina	27,50
Koeficijent determiniranosti	0,49

Slika 7.20 prikazuje utjecaj temperature taljevine i vremena naknadnog tlaka na rasteznu čvrstoću linije spoja ispitnih tijela. Može se vidjeti kako u ovom pokusu parametri nisu pokazali značajan utjecaj na rasteznu čvrstoću linije spoja.



Slika 7.19: Ovisnost rastezne čvrstoće o temperaturi taljevine i vremenu naknadnog tlaka u pokusu1

7.10 ANALIZA POKUSA 2 - AMORFNI PLASTOMER - ODREĐIVANJE UTJECAJA SIGNIFIKANTNIH PARAMETARA INJEKCIJSKOG PREŠANJA NA RASTEZNU ČVRSTOĆU LINIJE SPOJA ISPITNIH TIJELA OD POLISTIRENA

U tablici 7.15 prikazani su rezultati obrade utjecaja parametara na rasteznu čvrstoću u programskom paketu Design Expert modulom ANOVA (analiza varijance).

Tablica 7.15. Rezultati analize varijance – utjecaj parametara na rasteznu čvrstoću u pokusu2.

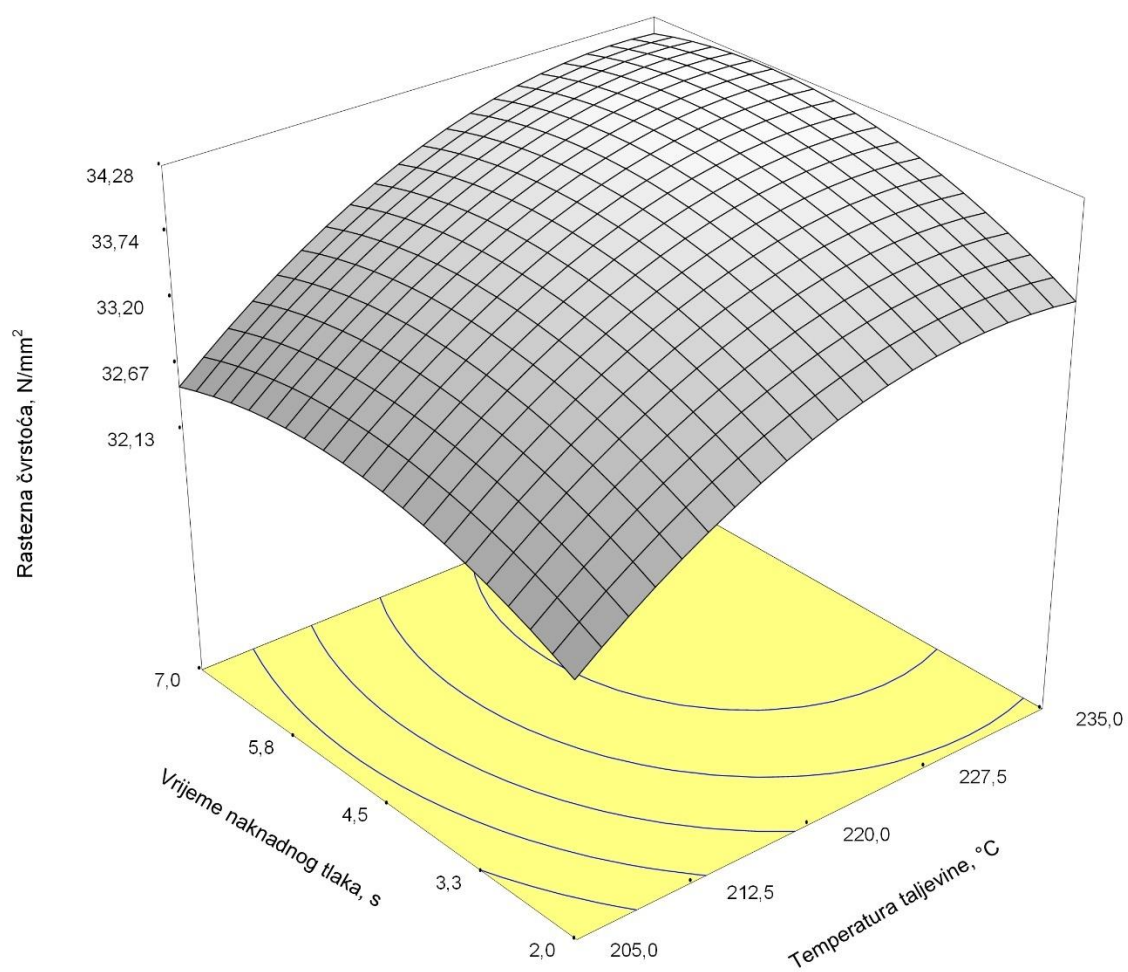
	Suma kvadrata odstupanja	Stupnjevi slobode	Srednji kvadrat odstupanja	Varijabla F	Rizik odbacivanja hipoteze H_0	
Model	2,871	5	0,574	4,419	0,064	Nije signifikantno
x_1	0,748	1	0,748	5,757	0,061	
x_2	0,272	1	0,272	2,095	0,207	
x_1^2	0,410	1	0,410	3,156	0,135	
x_2^2	0,938	1	0,938	7,220	0,043	
$x_1 \cdot x_2$	0,008	1	0,008	0,063	0,810	
Ostatak	0,649	5	0,129			Nije signifikantno
Odstupanje od modela	0,232	1	0,232	2,230	0,209	
Pogreška	0,417	4	0,104			
Ukupno	3,520	10				

U tablici 7.16 prikazani su osnovni statistički podaci o modelu.

Tablica 7.16. Pregled statističkih podataka o modelu - utjecaj parametara na rasteznu čvrstoću

Standardno odstupanje	0,36
Aritmetička sredina	33,64
Koeficijent determiniranosti	0,82

Slika 7.21 prikazuje utjecaj temperature taljevine i vremena naknadnog tlaka na rasteznu čvrstoću linije spoja ispitnih tijela. Kao i u slučaju polipropilena, može se vidjeti kako u ovom pokusu parametri nisu pokazali značajan utjecaj na rasteznu čvrstoću linije spoja.



Slika 7.20: Ovisnost rastezne čvrstoće o temperaturi taljevine i vremenu naknadnog tlaka u pokusu2

7.11 RASPRAVA O DOBIVENIM REZULTATIMA POKUSA 1 i 2

Pokusom je ustanovljeno da mijenjanje parametara temperatura taljevine i vrijeme naknadnog tlaka prema centralno-kompozitnom planu pokusa nema većeg utjecaja na rasteznu čvrstoću linije spoja niti kod inekcijskog prešanja polipropilena niti u slučaju polistirena.

Jedan od mogućih razloga je da je biran preuzak raspon temperatura taljevine kod oba materijala te da se trebalo malo izaći izvan okvira temperatura koje je proizvođač preporučio te onda promatrati bi li došlo do znatnih odstupanja.

Također, moguće je da raspon vremena naknadnog tlaka nije bio u području značajnih promjena otpresaka u ovisnosti o njegovom sniženju/povišenju te bi bilo bolje da se prethodno pokusu obavio pretpokus određivanja optimalnog vremena trajanja naknadnog tlaka za dobivanje maksimalne rastezne čvrstoće ispitnih tijela.

Prilikom izvedbe eksperimenta, uočeno je i da porast temperature taljevine utječe na smanjenje dimenzija otpreska, a produljenje vremena naknadnog tlaka utječe na povećanje dimenzija otpresaka, mogući je razlog ovakvih neznčajnih rezultata i to da su se utjecaji ova dva promatrana parametra međusobno poništavala u pokusu.

Jedno od zapažanja tokom ispitivanja rastezne čvrstoće materijala jest da bi kao izlazni parametar trebalo promatrati i žilavost otpresaka u ovisnosti o promjeni parametara.

9 ZAKLJUČAK

Ako se sagleda dosadašnji značaj i rasprostranjenost polimera u tehnologiji i industriji može se uvidjeti kako je tehnološki napredak današnjice, između ostalog, diktiran i razvojem polimera. Injekcijsko prešanje istaklo se među brojnim postupcima prerade polimera. Za daljnje optimiranje postupka injekcijskog prešanja potrebno je do kraja spoznati kakav utjecaj pojedini parametri imaju na svojstva dobivenog proizvoda.

U radu je teorijski opisan proces injekcijskog prešanja. Opisani su svi bitniji parametri injekcijskog prešanja i njihov utjecaj na svojstva otpresaka. Obrađeni su kalupi i ispitna tijela prema ISO normama.

U eksperimentalnom dijelu rada provedeni su pokusi određivanja utjecaja temperature taljevine i vremena naknadnog tlaka na rasteznu čvrstoću linije spoja injekcijski prešanih ispitnih tijela. Prvo za polipropilen a potom za polistiren.

Injekcijski prešana ispitna tijela koja zadovoljavaju ISO norme ispitana su na kidalici. Rezultati su obrađeni i analizirani u programu Design Expert. Zaključeno je da navedena dva parametara te njihova interakcija nemaju značajnijeg utjecaja na rasteznu čvrstoću linije spoja.

Rezultati ne daju željeni odgovor na pitanje - kojim parametrima i kako dobiti maksimalnu čvrstoću linije spoja injekcijski prešanih proizvoda. No i eliminacijski rezultati mogu pomoći u daljnjem biranju parametara čiji utjecaj treba ispitati.

10 LITERATURA

- [1] Čatić, I.: *Proizvodnja polimernih tvorevina*, Društvo za plastiku i gumu, Zagreb, 2006.
- [2] Cherrington, R.; Goodship, V.; Middleton, B.: *Design and Manufacture of Plastic Components for Multifunctionality*, Matthew Deans Publishing, USA, 2016.
- [3] Goodship, V: ARBURG *Practical guide to Injection Moulding*, iSmithers Rapra Publishing, 2010
- [4] <https://www.toolcraft.co.uk/plastic-injection-moulding/advice/help-injection-moulding-process.htm>
- [5] Johannaber, F.: *Injection Molding Machines*, Carl Hanser Verlag, München, 1994.
- [6] Barunica, M.: *Analiza utjecaja parametara injekcijskog prešanja na mehanička svojstva linije spajanja*, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.
- [7] Goodship, V.: *Troubleshooting Injection Moulding*, iSmithers Rapra Publishing, 2004
- [8] <http://ss-industrijska-strojarska-zg.skole.hr/upload/ss-industrijska-strojarska-zg/multistatic/74/10.%20Alati%20za%20preradu%20plasticnih%20masa.pdf>
- [9] http://www.kaiao-rprt.com/Case/gas-assist-injection-molding.html?clid=Cj0KCQjwzcbWBRDmARIsAM6uChXqBR3hxsq02WKFqXaZhtMciKcn8oxrqdrDF9-gd3sI3NsSYjHqQWMaAm58EALw_wcB
- [10] <https://clr.es/blog/en/plastic-injection-moulding-technologies/>
- [11] Clements, H.: *Bonding strength at solid-melt interface in a two-component injection moulding process*, Technische Universitet Eindhoven, Eindhoven, 2007.
- [12] Vukelić, E.: *Faktorski plan pokusa i analiza varijance pri miješanju prašaka*, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Zagreb, 2016
- [13] Rujnić-Sokele, M.: *Optimiranje procesa proizvodnje puhanih proizvoda od poli(etilentereftalata)*, Magistarski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2002.

11 PRILOZI

Tablica 11.1: Rezultati pokusa 1– određivanje utjecaja temperature taljevine i vremena naknadnog tlaka na rasteznu čvrstoću linije spoja ispitnog tijela od PP

Broj (stanje/ ponavljanje)	Temp. taljevine	Vrijeme Naknad. tlaka	Debljina	Širina	Površina	Sila	Rastezna čvrstoća
7,1	212	1,0	3,98	9,94	39,55	1061,32	26,83
7,2			3,98	9,94	39,55	1044,00	26,39
7,3			3,99	9,96	39,79	1085,21	27,31
7,4			3,99	9,94	39,71	1115,79	28,13
7,5			3,99	9,93	39,57	1133,99	28,62
6,1	235	4,5	4,01	9,99	40,03	984,77	24,64
6,2			3,96	9,88	39,11	1075,68	27,49
6,3			3,99	9,93	39,67	1012,29	25,55
6,4			4,01	9,98	40,04	928,06	23,25
6,5			4,04	9,97	40,26	934,67	23,43
11,1	212	4,5	4,00	9,90	39,55	1064,24	26,97
11,2			4,02	9,96	40,07	1161,49	29,15
11,3			4,01	9,99	40,09	1089,41	27,26
11,4			3,98	9,90	39,44	1051,99	26,7
11,5			4,03	9,98	40,25	1029,37	25,79
9,1	212	4,5	4,03	9,98	40,17	983,05	24,63
9,2			4,00	9,90	39,57	1162,65	29,43
9,3			4,01	9,95	39,85	1068,09	26,83
9,4			3,97	9,84	39,08	667,91	17,09
9,5			4,01	10,01	40,11	856,44	21,39
5,1	190	4,5	3,94	9,89	39,00	1250,14	32,08
5,2			4,04	9,99	40,34	1203,92	30,13
5,3			4,03	10,02	40,35	1203,82	30,04
5,4			4,02	10,01	40,19	1221,1	30,53
5,5			4,03	9,99	40,24	1236,65	30,95
4,1	228	7,0	4,01	9,97	39,96	996,49	24,98
4,2			3,98	9,96	39,59	1206,35	30,43
4,3			4,00	9,96	39,82	1138,77	28,65
4,4			4,03	10,03	40,43	1074,1	26,77
4,5			4,01	9,95	39,93	1151,32	28,85
2,1	228	2,0	3,96	9,86	39,03	873,57	22,37
2,2			3,99	9,97	39,78	935,84	23,53
2,3			4,00	9,92	39,66	850,13	21,53
2,4			3,98	9,94	39,58	800,64	20,24
2,5			4,01	9,99	40,11	860,71	21,49
3,1	197	7,0	4,00	9,96	39,79	1268,64	32
3,2			4,01	9,98	40,02	1247,54	31,17
3,3			4,05	10,04	40,65	1194,19	29,21
3,4			4,02	10,02	40,31	1223,03	30,36
3,5			4,03	10,04	40,46	1221,38	30,18

Broj (stanje/ ponavljanje)	Temp, taljevine	Vrijeme Naknad, tlaka	Debljina	Širina	Površina	Sila	Rastezna čvrstoća
10,1	212	4,5	4,01	9,95	39,91	751,45	18,84
10,2			3,99	9,90	39,50	1013,17	25,65
10,3			4,00	9,94	39,79	1018,14	25,61
10,4			4,01	9,94	39,86	1063,7	26,69
10,5			4,01	9,94	39,86	992,83	24,91
8,1	212	8,0	4,03	10,04	40,51	1247,95	30,84
8,2			4,05	10,05	40,69	1233,67	30,31
8,3			4,03	10,01	40,36	1225,7	30,41
8,4			4,03	10,04	40,44	1227,98	30,43
8,5			4,04	10,00	40,37	1239,53	30,76
13,1	212	4,5	3,98	9,92	39,50	1100,5	27,87
13,2			3,99	9,92	39,61	1064,82	26,9
13,3			3,99	9,94	39,66	1021,44	25,75
13,4			3,97	9,89	39,23	1153,6	29,38
13,5			4,00	9,94	39,73	863,536	21,77
1,1	197	2,0	4,01	9,96	39,91	1189,83	29,86
1,2			3,98	9,92	39,51	1191,91	30,19
1,3			3,99	9,92	39,56	1151,21	29,16
1,4			3,97	9,91	39,38	1233,02	31,34
1,5			3,98	9,92	39,50	1195,9	30,29
12,1	212	4,5	4,00	9,92	39,66	1058,53	26,74
12,2			3,99	9,92	39,60	962,77	24,32
12,3			3,98	9,91	39,46	1128,18	28,60
12,4			4,00	9,93	39,70	761,92	19,23
12,5			3,98	9,91	39,49	1056,66	26,79

*precrtana ponavljanja za pojedina sanja ne odgovaraju odzivu modela te su odbačena .

Tablica 11.2.: Rezultati pokusa 2– određivanje utjecaja temperature taljevine i vremena naknadnog tlaka na rasteznu čvrstoću linije spoja ispitnog tijela od PS

Broj (stanje/ ponavljanje)	Temp. taljevine	Vrijeme Naknad. tlaka	Debljina	Širina	Površina	Sila	Rastezna čvrstoća
7,1	220	1,0	3,98	10,11	40,24	1286,63	31,97
7,2			3,98	10,09	40,11	1316,83	32,82
7,3			4,02	10,11	40,61	1373,56	33,79
7,4			3,99	10,15	40,46	1312,51	32,41
7,5			3,99	10,12	40,39	1349,50	33,42
6,1	241	4,5	4,04	10,17	41,07	1425,99	34,71
6,2			4,03	10,12	40,78	1418,22	34,77
6,3			4,04	10,15	40,99	1378,43	33,61
6,4			4,01	10,13	40,67	1399,89	34,46
6,5			4,00	10,11	40,45	1386,50	34,29
11,1	220	4,5	4,02	10,14	40,73	1353,67	33,21
11,2			4,03	10,14	40,90	1328,81	32,52
11,3			4,03	10,14	40,91	1388,03	33,97
11,4			4,03	10,13	40,87	1380,94	33,82
11,5			4,02	10,12	40,66	1402,12	34,47
9,1	220	4,5	3,98	10,14	40,38	1315,42	32,59
9,2			3,99	10,13	40,44	1300,81	32,18
9,3			4,03	10,13	40,80	1417,77	34,73
9,4			4,03	10,14	40,82	1393,13	34,09
9,5			4,01	10,14	40,61	1406,09	34,58
5,1	200	4,5	4,02	10,15	40,84	1024,55	25,11
5,2			4,03	10,13	40,78	1194,93	29,3
5,3			4,02	10,13	40,70	1246,54	30,61
5,4			4,03	10,11	40,76	1121,32	27,52
5,5			4,03	10,14	40,84	1215,99	29,76
4,1	220	7,0	4,05	10,17	41,24	1366,99	33,19
4,2			4,04	10,16	41,03	1386,16	33,8
4,3			4,05	10,16	41,18	1399,56	34,01
4,4			4,06	10,16	41,26	1434,14	34,77
4,5			4,06	10,17	41,26	1385,52	33,56
2,1	235	2,0	4,01	10,15	40,67	1387,15	34,08
2,2			4,01	10,16	40,69	1343,70	33,01
2,3			4,02	10,15	40,77	1312,79	32,17
2,4			4,00	10,13	40,52	1354,09	33,41
2,5			4,00	10,14	40,56	1368,71	33,74
3,1	235	7,0	4,06	10,13	41,13	1280,05	31,12
3,2			4,06	10,14	41,18	1304,17	31,68
3,3			4,04	10,12	40,91	1350,57	32,85
3,4			4,04	10,17	41,12	1384,99	33,71
3,5			4,05	10,17	41,15	1347,02	32,7

Broj (stanje/ ponavljanje)	Temp. taljevine	Vrijeme Naknad. tlaka	Debljina	Širina	Površina	Sila	Rastezna čvrstoća
10,1	205	4,5	4,02	10,17	40,87	1426,00	34,91
10,2			4,04	10,14	40,98	1403,28	34,25
10,3			4,04	10,15	40,96	1432,33	34,96
10,4			4,05	10,15	41,13	1388,25	33,8
10,5			4,04	10,14	40,97	1312,31	32,03
8,1	220	8,0	3,99	10,11	40,33	1353,39	33,58
8,2			4,04	10,17	41,12	1437,89	34,99
8,3			4,07	10,15	41,33	1363,37	33,03
8,4			4,09	10,13	41,43	1398,34	33,75
8,5			4,07	10,19	41,44	1380,01	33,27
13,1	220	4,5	4,04	10,12	40,88	1365,57	33,4
13,2			4,06	10,14	41,13	1356,58	32,95
13,3			4,05	10,16	41,20	1430,56	34,77
13,4			4,06	10,13	41,15	1419,64	34,55
13,5			4,04	10,16	41,01	1417,37	34,53
1,1	205	2,0	3,99	10,17	40,58	1391,94	34,3
1,2			4,01	10,15	40,72	1346,50	33,11
1,3			4,02	10,14	40,73	1416,40	34,74
1,4			4,02	10,16	40,80	1377,14	33,75
1,5			4,02	10,13	40,74	1351,33	33,18
12,1	220	4,5	4,04	10,13	40,88	1429,13	34,96
12,2			4,03	10,13	40,86	1399,16	34,27
12,3			4,04	10,15	41,03	1401,02	34,2
12,4			4,02	10,15	40,84	1415,94	34,7
12,5			4,04	10,13	40,93	1381,08	33,75